

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Civil

Evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela

Autor: Gala Rojas Ramos

Tutor: Carmen Zarzuelo Romero

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela

Autor:
Gala Rojas Ramos

Tutor:
Carmen Zarzuelo Romero
Profesor Sustituto Interino

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela

Autor: Gala Rojas Ramos

Tutor: Carmen Zarzuelo Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a toda mi familia, a todos y cada uno de ellos, por apoyarme, por animarme, por confiar en mí y por no presionarme en ningún momento durante todos estos años. También a mis amigos, a los que conocí en la carrera y a los que llevan tanto tiempo conmigo, que son mi segunda familia. A los primeros, gracias por las innumerables horas que hemos pasado juntos, por las risas, los buenos ratos y toda vuestra ayuda. A los segundos, aunque viéndonos cada vez menos, gracias por estar siempre ahí para sacarme una sonrisa y hacer que me despejase cuando lo necesitaba.

Por último quiero dar las gracias a las dos personas que han hecho posible este Trabajo de Fin de Grado. A mi tutora, Carmen, por su inestimable ayuda, por responder cientos de mensajes, incluso en vacaciones, y atenderme en tutorías cada vez que estaba perdida (muchas veces). Y a Alfredo no solo por su apoyo y ánimos cuando más los necesitaba o por conseguir que me esforzase tanto durante este año, también por ayudarme a resolver todos y cada uno de los problemas de programación que se me iban presentando, aun estando a veces a cientos de kilómetros, como él diría, gracias por ser mi patito de goma.

Este trabajo está dedicado a todos vosotros. ¡Gracias!

Resumen

Este trabajo de fin de grado se centra en el estudio de la evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela, situada en el Sur-Oeste de la Península Ibérica mediante el modelo hidrodinámico Delft3D (módulo WAVE). Dicho modelo se ha validado con coeficientes $R=0,82$ y $S=0,82$ para altura significativa, $R=0,74$ y $S=0,54$ para el periodo pico y $R=0,95$ y $S=0,95$ para la dirección de oleaje.

Se han definido 5 forzamientos de una semana de duración para los que se ha calculado el histograma de frecuencias altimétricas, la función de densidad tipo Weibull, la resultante media anual (RMA) y el transporte de sedimentos según la fórmula del CERC para distintos puntos de la costa.

La finalidad del modelo es la de comparar los efectos del oleaje producido por estos forzamientos en el transporte de sedimentos, con el fin de poder analizar el patrón de sedimentación.

Para el clima marítimo se han analizado la altura significativa de ola que oscila entre 0 y 4 metro, siendo las más frecuentes entre 0 y 0,5 metros en un 55,46% de los casos, el periodo pico que oscila entre 1 y 18 segundos, dándose los más frecuentes, entre 4 y 7 segundos, en un 44,15% de los casos y en cuanto a la dirección de procedencia del oleaje, las más frecuentes son OSO y O (56,72%) y SE (15,12%). También se han analizado el régimen medio y extremal. En el primer caso se ha obtenido que la altura cuya probabilidad de no excedencia es del 56% es 0,4 metros, y la altura cuya probabilidad de no excedencia es del 88% es 1 metro. En cuanto al régimen extremal, se ha obtenido una probabilidad de no excedencia del 27,26% para una altura de 3 metros, otra de 45,84% para 3,4 metros y una probabilidad de no excedencia del 93% para 4,2 metros.

El análisis de los resultados de la simulación permite concluir que la RMA aumenta durante los temporales, llegando a ser aproximadamente 6 veces mayor para el temporal correspondiente al escenario 4 (del 25 de octubre de 2003 al 1 de noviembre de 2003 y cuya altura máxima registrada fue de 3,9 metros), el cual es el de mayor influencia, y en general la dirección tiende a virar hacia el Este cuanto más lejos queda de la desembocadura del río Guadiana. Como ejemplo del aumento de la RMA, para el escenario 0 (semana sin temporales) se ha obtenido una media de 130,504 N/s en la costa, mientras que para el 4º escenario (el de mayor influencia) se ha obtenido 911,002 N/s de media.

La fórmula del CERC referida anteriormente calcula el transporte longitudinal de sedimentos basándose en la hipótesis de que el transporte de sedimentos es directamente proporcional a la componente paralela a la costa del flujo de energía en la zona de rompientes. Tras aplicar dicha fórmula para cada escenario se concluye que la tasa de transporte longitudinal de sedimentos también aumenta en los temporales, especialmente para el 4º caso como ocurre con la RMA. De media para el escenario 0 se ha obtenido un transporte total de sedimentos de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el escenario 4 se ha obtenido $-0,5398 \text{ m}^3/\text{s}$. Aunque generalmente el transporte se da en dirección Este (como se ve en los resultados del escenario 0), los temporales y las barras de sedimento que existen frente a la línea de costa pueden influir en la dirección del transporte de sedimentos, virándolo hasta 180° (de ahí el valor negativo del escenario 4). Gracias a estos cálculos han podido definirse los puntos de erosión y acumulación de sedimentos.

Finalmente se han analizado las actuaciones futuras en función de los resultados obtenidos, seleccionando la más adecuada y estudiando sus ventajas e inconvenientes.

Abstract

This end-of-degree project is focused on the study of the morphological evolution of the coastal zone of Isla Canela, which is located in the South-West of Spain, through the hydrodynamic model of Delft3D (WAVE module). This model has been proved reaching coefficients of $R=0.82$ and $S=0.82$ for the significant wave height, $R=0.74$ and $S=0.54$ for the peak wave period and $R=0.95$ and $S=0.95$ for the wave direction.

Five forcing situations of a week duration have been defined and for those it has been calculated the histogram of altimetrical frequencies; the Weibull type density and distribution functions; the resulting annual average and the sediment transport according to the CERC formula for different parts of the coast.

The model's purpose is to compare the effects of the surf produced by those forcing situations that were previously mentioned on the sediment transport so it is possible to analyze the sedimentation pattern.

On the subject of maritime climate, it has been analyzed the significant wave height which swings between 0 and 4 meters, being the most common between 0 and 0.5 meters in 55.46 % of cases. For its part, the peak wave varies between 1 and 18 seconds, occurring more frequently between 4 and 7 seconds, in a 44.15% of cases. Finally, as for the wave direction of provenance, the most frequent are WSW and W (56.72 %) y SE (15.12%). In addition, the medium and extreme wave regime has been analyzed. For the first one, it has been register that the height whose probability of non-exceedance is 56% is 0.4 meters, and 88% for 1 meter. On the other hand, for the extreme wave regime it has been register 27.26% as the probability of non-exceedance for 3 meters of height, 45.84% for 3.4 meters and 93% for 4.2 meters.

The analysis of the simulation's results allows to conclude that the resulting annual average rises during rough weathers, it is approximately 6 times higher for the 4th case (from the 25th of october 2003 to the 1st of november 2003, which highest height registered was 3.9 meters), which is the most influential, and in general the direction tends to turn towards the East the further away it is from the river mouth of the Guadiana. As an example of the RMA increase, it has been obtained for the case 0 (week without storms) the medium value of 130,504 N/s, while for the 4th case (the most intense) this value is 911,002 N/s.

The previously mentioned CERC formula calculates the longitudinal sediment transport based on the hypothesis that sediment transport is directly proportional to the component parallel to the coast of the energy flow on the surf zone. After applying this formula it is concluded that the longitudinal sediment transport also rises in rough weathers, especially on the 4th case as it was seen on the subject of RMA. For case 0, the medium value of the total sediment transport that has been obtained is 0.065 m³/s, while for the 4th scenario this value is -0.5398 m³/s. Although most of the transport occur eastbound (as it is seen on the previous result for case 0), rough weathers and the bars of sediment that exists in front of the shoreline can influence the direction of sediment transport changing it up to 180° (hence the negative value of the 4th scenario). Thanks to those calculations, it has been possible to define sediment accumulation and erosion points.

Finally, the future interventions have been analyzed according to the results, selecting the most suitable and studying its advantages and disadvantages.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	26
1.1. Localización	26
1.2. Motivación	28
1.3. Objetivos	29
1.3.1. Objetivo general	29
1.3.2. Objetivos específicos	29
2 Zona de estudio	30
2.1. Antecedentes y problemática	31
2.2. Situación actual	36
2.3. Actuaciones futuras	38
3 Metodología	41
3.1. Clima marítimo	41
3.1.1. Datos de partida	41
3.1.1. Descripción general en profundidades indefinidas	41
3.1.2. Régimen medio	42
3.1.3. Régimen extremal	42
3.2. Escenarios	43
3.3. Modelo numérico	43
3.3.1. Calibración y validación del modelo	43
3.3.2. Análisis de régimen medio y régimen extremal	45
4 Clima Marítimo	47
4.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio	47
4.2. Oleaje	48
4.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas	48

4.2.2	Régimen medio anual de Hs en profundidades indefinidas	56
4.2.3	Régimen extremal	58
4.3.	<i>Viento</i>	61
4.3.1	Descripción general del viento en profundidades indefinidas.	61
5	Modelo numérico	65
5.1.	<i>Ecuaciones del módulo WAVE</i>	65
5.2.	<i>Datos de entrada</i>	65
5.2.1	Línea de costa	65
5.2.2	Malla	66
5.2.3	Batimetría	68
5.2.4	Condiciones de contorno	68
5.2.5	Parámetros del modelo	68
5.3.	<i>Calibración del modelo</i>	69
5.4.	<i>Parámetros tras la calibración</i>	71
6	Análisis de escenarios	73
6.1.	<i>Análisis del régimen medio</i>	73
6.1.1	Escenario 0	73
6.1.2	Escenario 1	81
6.1.3	Escenario 2	88
6.1.4	Escenario 3	95
6.1.5	Escenario 4	102
6.1.6	Comparación de resultados	109
6.2.	<i>Análisis del transporte de sedimentos</i>	112
6.2.1	Ejemplo de procedimiento para el escenario 0	112
6.2.2	Tamaño de sedimentos y validación de resultados	114
6.2.3	Resultados	115
7	Conclusiones	119
7.1.	<i>Clima marítimo</i>	119
7.2.	<i>Modelo numérico</i>	119
7.3.	<i>Análisis de escenarios</i>	119
7.4.	<i>Alegaciones a las actuaciones futuras</i>	120
Apéndice A:	Conjunto de datos SIMAR	124
A.1.	<i>Procedencia y obtención del conjunto de datos</i>	124
A.2.	<i>Subconjunto SIMAR-44</i>	124
A.2.1	Viento	124
A.2.2	Oleaje	124
A.3.	<i>Subconjunto WANA</i>	125
A.3.1	Viento	125
A.3.2	Oleaje	125
Apéndice B:	Ecuaciones WAVE/SWAN	127
B.1.	<i>Ecuación de balance de acción</i>	127
B.1.1	Transferencia de energía al oleaje debida al viento, S_{in}	127
B.1.2	Interacciones no lineales entre olas, S_{nl}	129
B.1.3	Disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping, $S_{ds,w}$	130
B.1.3	Disipación debida a la rotura por disminución de profundidad, $S_{ds,br}$	131
B.1.3	Disipación de energía por fricción con el fondo, $S_{ds,b}$	132
Apéndice C:	Parámetros WAVE	133
C.1.	<i>Módulo WAVE</i>	133
C.1.1.	Descripción (Description)	133
C.1.2.	Hidrodinámica (Hydrodynamics)	133

C.1.3 Malla (Grids)	133
C.1.4 Periodo de tiempo (Time frame)	134
C.1.5 Condiciones de contorno (Boundaries)	134
C.1.6 Obstáculos (Obstacles)	134
C.1.7 Parámetros físicos (Physical parameters)	135
C.1.8 Parámetros numéricos (Numerical parameters)	136
C.1.9 Curvas de salida (Output curves)	137
C.1.10 Parámetros de salida (Output parameters)	137
C.1.11 Parámetros adicionales (Additional parameters)	137
Bibliografía y referencias	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Frecuencias de alturas de ola	49
Tabla 4-2. Tabla de dispersión H_s - T_p	50
Tabla 4-3. Frecuencias de periodo pico	51
Tabla 4-4. Tabla de dispersión T_p - Dir	52
Tabla 4-5. Frecuencias de dirección	53
Tabla 4-6. Tabla de dispersión H_s - Dir	54
Tabla 4-7. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio	56
Tabla 4-8. Frecuencias de velocidad de viento	61
Tabla 4-9. Frecuencias de dirección media de procedencia del viento	62
Tabla 4-10. Tabla de dispersión V_v - Dirv	63
Tabla 5-1. Tabla comparadora de ajuste para H_s	70
Tabla 5-2. Tabla comparadora de ajuste para T_p	70
Tabla 5-3. Tabla comparadora de ajuste para Dir	71
Tabla 6-1. Tabla de frecuencias alimétricas (Escenario 0)	75
Tabla 6-2. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 0)	76
Tabla 6-3. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 0)	78
Tabla 6-4. RMA (Escenario 0)	80
Tabla 6-5. Tabla de frecuencias alimétricas (Escenario 1)	82
Tabla 6-6. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 1)	84
Tabla 6-7. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 1)	86
Tabla 6-8. RMA (Escenario 1)	86
Tabla 6-9. Tabla de frecuencias alimétricas (Escenario 2)	89
Tabla 6-10. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 2)	91
Tabla 6-11. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 2)	93
Tabla 6-12. RMA (Escenario 2)	93
Tabla 6-13. Tabla de frecuencias alimétricas (Escenario 3)	96
Tabla 6-14. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 3)	98
Tabla 6-15. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 3)	100
Tabla 6-16. RMA (Escenario 3)	100
Tabla 6-17. Tabla de frecuencias alimétricas (Escenario 4)	103

Tabla 6-18. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 4)	105
Tabla 6-19. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 4)	107
Tabla 6-20. RMA (Escenario 4)	107
Tabla 6-21. Tabla comparativa de alturas significantes medias según escenarios	109
Tabla 6-22. Tabla comparativa RMA según escenarios	110
Tabla 6-23. Muestras de sedimentos	114
Tabla 6-24. Transporte longitudinal medio para el escenario 0	114
Tabla 6-25. Transporte longitudinal máximo de sedimentos	115
Tabla 6-26. Transporte longitudinal total de sedimentos.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Tramo oriental de Isla Canela	26
Figura 1-2. Localización de Isla Canela	27
Figura 1-3. En verde zona protegida (Red Natura 2000)	27
Figura 1-4. Actuación en la playa, aporte de arena.	28
Figura 1-5. Consecuencias de los temporales	29
Figura 2-1. Sectores del área de estudio	30
Figura 2-2. Mapa de Unidades fisiográficas en el entorno del estuario del Guadiana. (REDIAM 2007)	31
Figura 2-3. Estuario del Guadiana (Gonzalez et al., 2001)	31
Figura 2-4. Fotografía desde Isla Canela durante la marea baja.	32
Figura 2-5. Evolución del Banco do O’Bril desde 1986 (-2 m bajo el nivel del mar)	32
Figura 2-6. Estadios del ciclo del Banco do O’Bril	33
Figura 2-7. Evolución del área del Banco do O’Bril entre 1876 y 1978	33
Figura 2-8. Evolución del sedimento en la margen occidental del estuario del Guadiana	34
Figura 2-9. a) Evolución total promedio de la costa al este y al oeste (1956/58-1999). b) Desviación típica del promedio de las tasas. c) Tasas de cambio promedio de la costa.	35
Figura 2-10. Evolución batimétrica del delta entre 1970 y 2010.	35
Figura 2-11. Protección de escollera frente a urbanizaciones en Isla Canela.	36
Figura 2-12. Acumulación contra el dique de Punta del Moral	36
Figura 2-13. Evolución de la línea de costa y de las barras.	37
Figura 2-14. Variación de superficie de playa en pleamar entre los años 2004 y 2011 en la playa de Isla Canela	37
Figura 2-15. Frente costero de Isla Canela (2016) y zonas urbanizadas con riesgo	38
Figura 2-16. Alternativa 1 – Movimiento de la arena	38
Figura 2-17. Alternativa 2 – Protección de la zona en riesgo	39
Figura 2-18. Alternativa 3 – Construcción de dos espigones cortos.	40
Figura 3-1. Procedimiento de calibración del modelo	44
Figura 4-1. Localización SIMAR 5026021	47
Figura 4-2. Localización SIMAR 5026023	47
Figura 4-3. Distancia entre puntos SIMAR	47
Figura 4-4. Serie temporal de altura significativa de ola	48

Figura 4-5. Histograma de altura significativa de ola	49
Figura 4-6. Gráfico de dispersión H_s - T_p	49
Figura 4-7. Histograma de periodo pico	51
Figura 4-8. Gráfico de dispersión Dir - T_p	51
Figura 4-9. Histograma de dirección media de procedencia	53
Figura 4-10. Gráfico de dispersión H_s - Dir	53
Figura 4-11. Rosa de oleaje SIMAR 5026021	55
Figura 4-12. Función de densidad	56
Figura 4-13. Función de distribución	56
Figura 4-14. Función de distribución en papel probabilístico	57
Figura 4-15. Umbral en la serie temporal de máximos mensuales. SIMAR 5026021	58
Figura 4-16. Semana sin temporales (POT)	59
Figura 4-17. Umbral y temporales (POT)	59
Figura 4-18. Función de densidad y distribución de Gumbel	60
Figura 4-19. Histograma de velocidad media de viento	61
Figura 4-20. Histograma de dirección media de procedencia del viento	62
Figura 4-21. Gráfico de dispersión V_v - Dir_v	62
Figura 4-22. Rosa de viento SIMAR 5026021	64
Figura 5-1. Terreno y línea de costa.	66
Figura 5-2. Superficie 3D del terreno	66
Figura 5-3. Malla en azul sobre el terreno. Batimetría en metros	67
Figura 5-4. Batimetría en metros y zona de estudio en recuadro.	68
Figura 5-5. Comparación de H_s según coeficiente de Collins	69
Figura 5-6. Comparación de T_p según coeficiente de Collins	69
Figura 5-7. Comparación de Dir según coeficiente de Collins	70
Figura 6-1. Puntos de control	73
Figura 6-2. Serie temporal de altura significativa (Escenario 0)	73
Figura 6-3. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 0)	74
Figura 6-4. Tendencia de la frecuencia de los rangos de H_s (Escenario 0)	75
Figura 6-5. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 0)	75
Figura 6-6. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 0)	77
Figura 6-7. Funciones de distribución (Escenario 0)	77
Figura 6-8. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 0)	78
Figura 6-9. Vectores RMA (Escenario 0)	80
Figura 6-10. Serie temporal de altura significativa (Escenario 1)	81
Figura 6-11. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 1)	81
Figura 6-12. Tendencia de la frecuencia de los rangos de H_s (Escenario 1)	82
Figura 6-13. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 1)	83

Figura 6-14. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 1)	84
Figura 6-15. Funciones de distribución (Escenario 1)	85
Figura 6-16. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 1)	86
Figura 6-17. Vectores RMA (Escenario 1)	87
Figura 6-18. Serie temporal de altura significativa (Escenario 2)	88
Figura 6-19. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 2)	88
Figura 6-20. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 2)	89
Figura 6-21. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 2)	90
Figura 6-22. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 2)	91
Figura 6-23. Funciones de distribución (Escenario 2)	92
Figura 6-24. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 2)	93
Figura 6-25. Vectores RMA (Escenario 2)	94
Figura 6-26. Serie temporal de altura significativa (Escenario 3)	95
Figura 6-27. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 3)	95
Figura 6-28. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 3)	96
Figura 6-29. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 3)	97
Figura 6-30. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 3)	98
Figura 6-31. Funciones de distribución (Escenario 3)	99
Figura 6-32. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 3)	100
Figura 6-33. Vectores RMA (Escenario 3)	101
Figura 6-34. Serie temporal de altura significativa (Escenario 4)	102
Figura 6-35. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 4)	102
Figura 6-36. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 4)	103
Figura 6-37. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 4)	104
Figura 6-38. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 4)	105
Figura 6-39. Funciones de distribución (Escenario 4)	106
Figura 6-40. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 4)	107
Figura 6-41. Vectores RMA (Escenario 4)	108
Figura 6-42. Diagrama comparativo de Hs y frecuencias medias	109
Figura 6-43. Vectores RMA. Plano general (Cada color corresponde a un escenario, ver leyenda)	110
Figura 6-44. Comparación de la RMA de cada escenario según P.C	111
Figura 6-45. Comparación de la RMA de cada P.C según escenario	111
Figura 6-46. Perfiles perpendiculares a la costa	112
Figura 6-47. Diagrama comparativo de índices de rotura (Escenario 0, perfil 1)	113
Figura 6-48. Ángulo de rotura	113
Figura 6-49. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 0)	116
Figura 6-50. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 1)	116
Figura 6-51. Vectores de dirección de oleaje (Escenario 1)	116

Figura 6-52. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 2)	117
Figura 6-53. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 3)	117
Figura 6-54. Vectores de dirección de oleaje (Escenario 3)	117
Figura 6-55. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 4)	118
Figura 7-1. Puntos de referencia de la playa.	120
Figura 7-2, Restitución de la línea de costa de 2004.	121
Figura 7-3. A la izquierda playa completamente erosionada y a la derecha escollera destruida.	121
Figura 7-4. Alternativa 3. En rojo hipótesis de posible línea de costa a largo plazo como consecuencia de las obras.	122
Figura C-0-1. Malla teórica	133

1 INTRODUCCIÓN

Los ambientes sedimentarios costeros son sistemas naturales que trabajan bajo fuertes influencias dinámicas tales como el viento, el oleaje y los procesos de sedimentación, que inducen continuos cambios morfológicos, creando una situación de equilibrio inestable. La geomorfología y la estratigrafía de estos entornos están controlados por tres factores principales: los cambios relativos del nivel del mar, el suministro de sedimentos y los procesos hidrodinámicos costeros. (Davis et al., 1987; Cowell y Thom, 1994). La actividad humana puede afectar directamente al suministro de sedimentos y a los procesos hidrodinámicos. Estas modificaciones generan importantes desajustes sedimentarios que se reflejan en cambios en la evolución y la evolución de los ambientes costeros (Morales et al., 2004).

Estos efectos antrópicos pueden ser resultado de actividades tales como: construcción de presas, deforestación, urbanización, deforestación, construcción de muelles y diques, etc.

En la costa onubense y en particular en la costa de Isla Canela, la actividad humana ha modificado los procesos costeros y el transporte litoral de sedimentos en las últimas décadas (Figura 1-1). Este transporte se ha visto modificado por la construcción de diques, puertos y áreas residenciales entre otros. Infraestructuras como los diques constituyen una barrera para la circulación de la arena y generan un déficit en el balance de sedimentos, lo que causa la erosión de las playas. Además de este efecto barrera, los diques provocan la refracción e inducen la difracción del oleaje, lo que deriva en efectos erosivos en la costa que ponen en peligro la zona urbanizada más cercana a la costa. Además, hay que sumarle a estos efectos las modificaciones sobre la sedimentación/erosión debido a diferentes forzamientos climatológicos, como tormentas y temporales, por lo que es primordial analizar el clima de la zona.

1.1. Localización

Isla Canela pertenece al término municipal de Ayamonte, Huelva (SO de España, Figura 1-2). Es la última playa de la Costa de la Luz, separada del Algarve portugués por el río Guadiana, y de las marismas de Isla Cristina por el Río Carreras. La línea de costa comprendida entre el dique sumergido, en la margen oriental del estuario del Guadiana, y el dique occidental o dique de poniente del río Carreras tiene una longitud de 7,5 km y a lo largo de ella pueden encontrarse numerosas barras de gran superficie (Figura 1-1).

Ubicándose exactamente entre la desembocadura del río Guadiana y el río Carreras, Isla Canela proporciona el acceso a zonas y lugares de especial interés cultural, deportivo, turístico y comercial.



Figura 1-1. Tramo oriental de Isla Canela (Fuente: hoy.es/infoplayas)

Al igual que el resto de la zona, la isla está formada mayormente por marismas, debido a la sedimentación que se produce en la desembocadura del Guadiana. Estas marismas forman parte de las zonas protegidas de la Red Natura 2000 (Figura 1-3) y proporcionan la presencia habitual de innumerables especies de aves, tales como, flamencos, cormoranes o gaviotas, que se alimentan, descansan y crían en ellas.



Figura 1-2. Localización de Isla Canela



Figura 1-3. En verde zona protegida (Red Natura 2000)

1.2. Motivación

La costa de Isla Canela ha venido sufriendo un proceso erosivo muy intenso desde la construcción de los encauzamientos del río Guadiana hasta la actualidad. Algunas zonas de la playa han sufrido retrocesos superiores a los 200 metros en solo una década (1999-2010). Este hecho, unido al progreso de las actividades urbanizadoras en la isla, ha dado lugar a una situación de riesgo muy elevado en toda la zona.

Las playas onubenses están sometidas a una fuerte dinámica litoral que es característica del frente atlántico, esta dinámica se ve además exacerbada por la alteración que el propio ser humano ha ocasionado en la costa a lo largo de los años. En este sentido el caso de Isla Canela, es un caso extremo. Las obras de dragado y alteración de la desembocadura del Guadiana e incluso la construcción de edificaciones en la costa, han provocado la alteración del estado natural del litoral. [4]

La erosión provocada por la dinámica litoral y los desperfectos derivados de los temporales marítimos dejan cada año como resultado una serie de perjuicios que no solo atañen a lo meramente medioambiental, sino que ocasiona cuantiosas pérdidas e inconvenientes a diversos sectores económicos de los que suele depender la zona. El sector más dañado, sin duda, es el sector turístico. Por ello cada año es necesario contemplar medidas de restauración de la playa, que se basan fundamentalmente en aplicar aportes de arena para compensar las pérdidas ocasionadas por la acción del viento y el oleaje (Figura 1-4). [4]



Figura 1-4. Actuación en la playa, aporte de arena. (Fuente: HuelvaYa.es)

Tras estudios como el elaborado por la consultoría medioambiental HIDTMA bajo contrato con el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, “Estudios de dinámica litoral en Isla Canela (Huelva)”, parece que Isla Canela está avocada a “desaparecer” como playa y zona de atracción turística en un futuro no muy lejano si no se llevan a cabo actuaciones a más largo plazo que las actuaciones de aporte que se están aplicando. Tanto en Isla Canela como en la parte oriental de la isla, Punta del Moral, se han construido urbanizaciones sin pensar en el futuro y hoy en día estas urbanizaciones se encuentran en una zona de alto riesgo, llegando a ser necesaria la construcción de un muro de contención de unos mil metros aproximadamente para la protección de esta zona.

Las playas de este tramo costero son visitadas durante el período estival por unas 48.000 personas, aproximadamente, procedentes de 8.200 apartamentos ubicados desde Isla Canela hasta Punta del Moral y en el entorno del campo de golf, a los que hay que añadir las alojadas en las 1.600 habitaciones de los cuatro hoteles situados en la zona y las que habitan en unas 3.000 viviendas dispersas en este entorno. Además, del público en general procedente tanto del municipio de Ayamonte como de otras áreas próximas al mismo, que genera un importante e indeterminado número de visitantes que sostienen la economía de la zona. [6]

La idea de este proyecto surge tras observar personalmente los cambios que ha sufrido la playa de Isla Canela año tras año, así como los desperfectos y las pérdidas de arena que se producen tras cada temporal. En los últimos años muchos han sido los problemas causados por los temporales, lo que ha obligado a algunos negocios a buscar soluciones o a trasladarse en el peor de los casos (Figura 1-5).



Figura 1-5. Consecuencias de los temporales. (Fuente: Diario de Huelva)

Estudios como el del presente documento sirven para mejorar el diseño de las posibles alternativas para mitigar los impactos derivados de la actuación humana y de agentes como el oleaje. Para este fin se hace uso de la herramienta Delft3D que permite simular el oleaje y extraer datos que aportan una idea de la incidencia de la energía del mismo, y de la sedimentación/erosión que se produce en la línea de costa.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo final de este proyecto es el de estudiar la evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela, a partir de un modelo matemático y el cálculo del transporte de sedimentos ubicando los puntos de erosión y acumulación de sedimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Análisis de la situación actual de la zona de estudio.
- Estudio del clima marítimo de la zona de estudio.
- Calibración y validación de un modelo numérico de propagación de oleaje para la costa de Isla Canela.
- Simulación del régimen medio y de tormenta para analizar la influencia de estos sobre la hidrodinámica de la costa.
- Análisis de los resultados obtenidos al simular los distintos casos con el modelo numérico calibrado.
- Redacción de conclusiones y recomendaciones.

2 ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio es el tramo de costa comprendido entre el dique sumergido, en la margen oriental del estuario del Guadiana, y el dique occidental del río Carreras, que como se ha dicho anteriormente tiene una longitud de 7,5 km aproximadamente. Se trata de una costa de tipo disipativa con una granulometría media de 0,29 mm., una pendiente muy plana y una amplia zona de rompiente, dominada por una serie de barras arenosas. Estas barras se han conformado por los sedimentos aportados por el río y los bajos ya existentes que eran los restos de la antigua flecha del Guadiana, estos son conocidos como Bajos de O'Brill. Dicha alimentación continua de sedimentos va provocando el aumento continuado de los bajos, de tal forma que son visibles hoy en día a media marea.

Estos bajos se van configurando en planta con forma de medias lunas que parten del extremo de poniente de la flecha de Isla Canela y se desarrollan paralelos a la costa, hasta alcanzar la zona central (Figura 2-1), donde en bajamar se unen a la playa. En el extremo de levante, en cambio, sale un nuevo bajo que desarrollándose igualmente en forma de media luna alcanza las proximidades de la desembocadura del río Carreras, Isla Cristina.

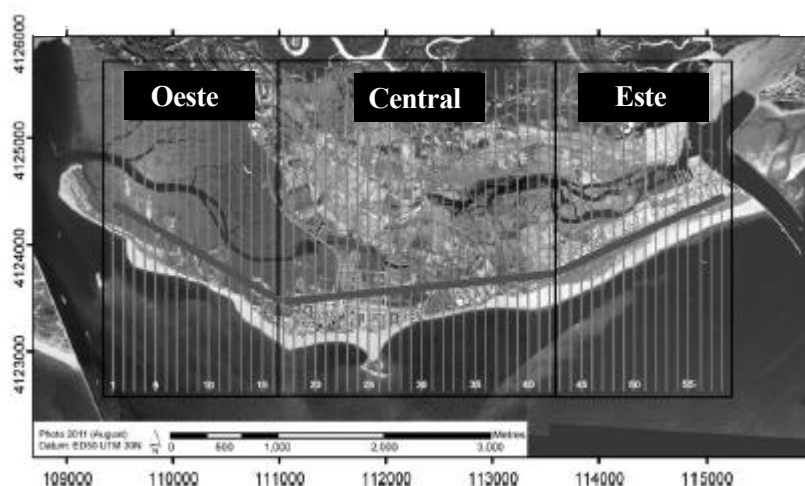


Figura 2-1. Sectores del área de estudio. (Garel et al., 2014)

Dicha estructura de bajos crea dos canales de marea llamados por Morales et al. (1994) canal principal de reflujo y canal secundario de flujo.

El estuario del Guadiana está en clara fase de colmatación y, además, se encuentra en una fase en la que ha pasado de ser estuario, entendiéndose como “...*entrantes de grandes profundidades*...” (Puig, 1921) a ser una ría, y en la mayor parte de su extensión en marismas en fase de colmatación avanzada (Figura 2-2).

En cuanto al régimen mareal, se trata de un régimen mesomareal con un rango medio de 2.15 metros, semidiurno y con una oscilación diaria leve (Borrego y Pendón, 1989). El clima marítimo está dominado por olas de energía moderada procedentes del O-SO (71% de ocurrencia) y del SE (23% de ocurrencia). Este oleaje tiene una altura de ola significativa anual de 1 m y un periodo pico de 8.2 segundos (Costa et al., 2001).

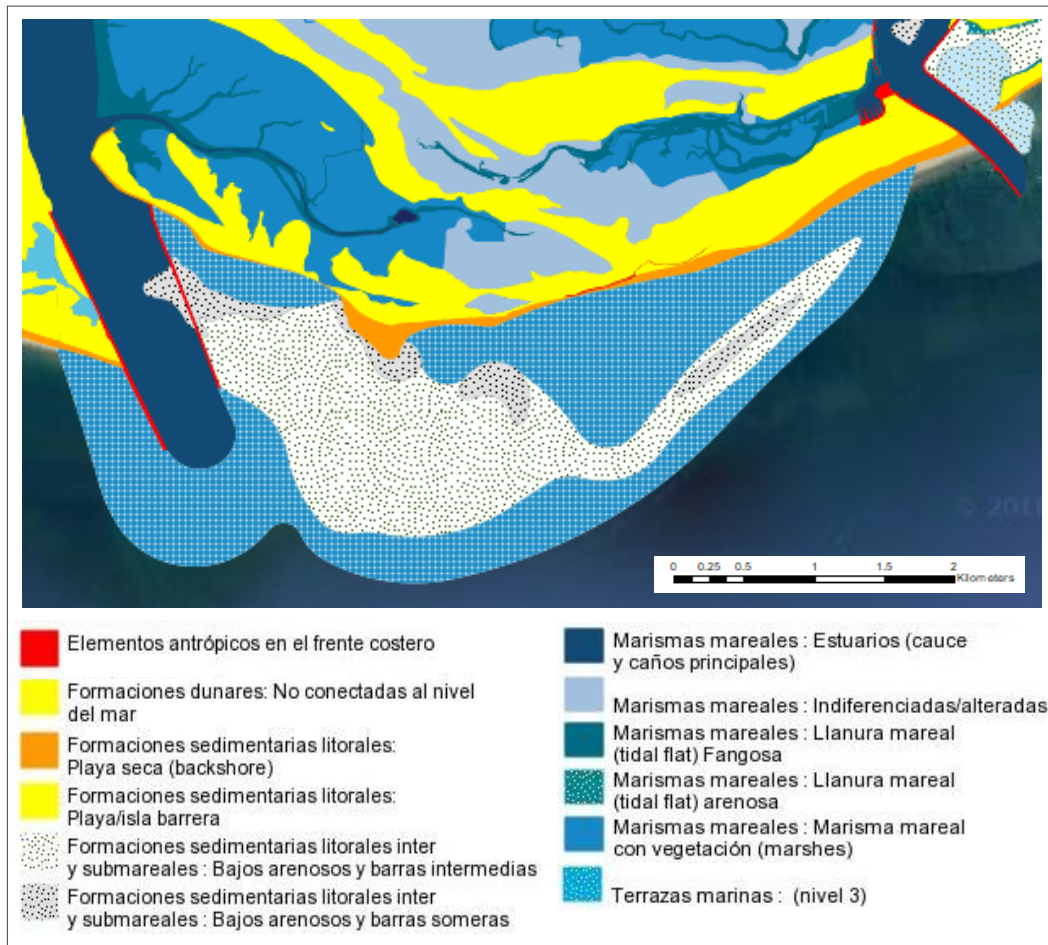


Figura 2-2. Mapa de Unidades fisiográficas en el entorno del estuario del Guadiana. (REDIAM 2007)

2.1. Antecedentes y problemática

Antaño la boca del estuario del río Guadiana estaba dominada por el banco de arena ‘Banco do O’Bril’, el cual tenía un carácter muy dinámico que a menudo causaba problemas para el tráfico naval (Weinholtz, 1978). En un intento de controlar la migración del banco de arena y evitar futuras obstrucciones del canal principal del estuario se construyeron dos grandes diques a ambos lados del estuario entre 1972 y 1974. (Dias, 1988).

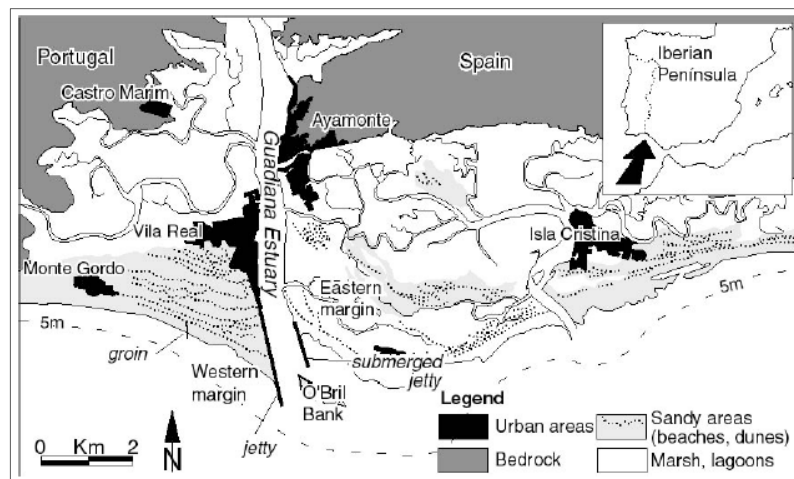


Figura 2-3. Estuario del Guadiana (Gonzalez et al., 2001)

La boca del estuario puede ser dividida en tres elementos principales: La margen portuguesa, el banco de arena O'Bril y la margen española (Figura 2-3). Los principales elementos antropogénicos son el dique de la margen portuguesa del río, que tiene una longitud de 2040 m, un dique sumergido de 900 m en la margen española (Figura 2-4). (Weinholtz, 1978; Dias, 1988)

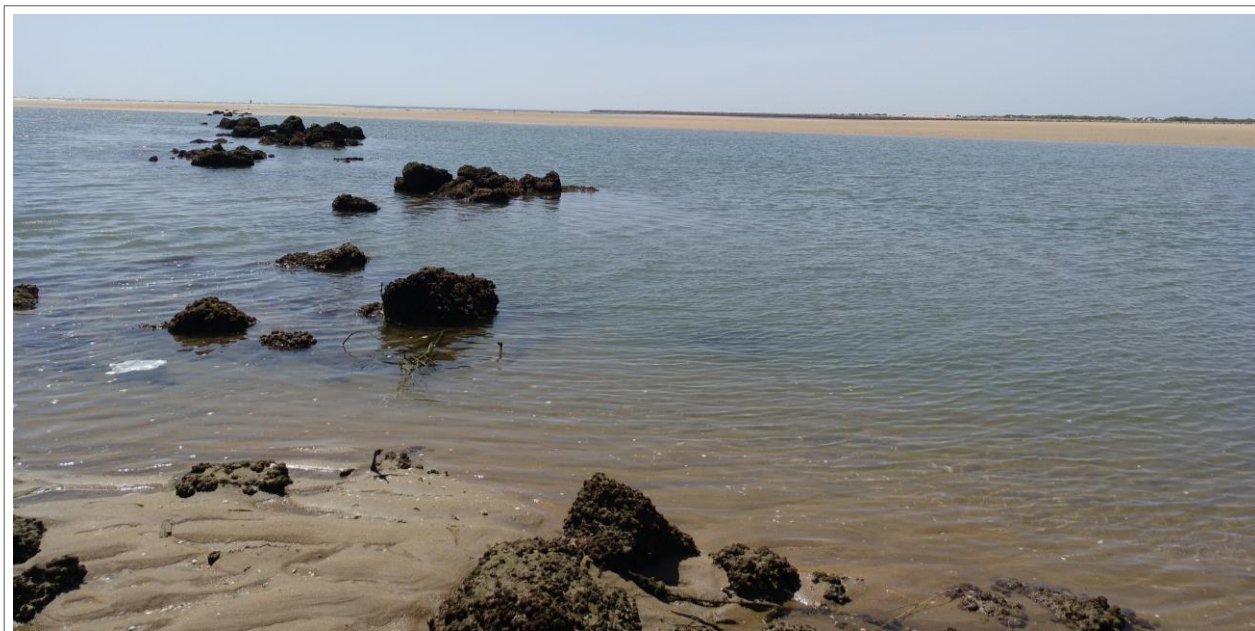


Figura 2-4. Fotografía desde Isla Canela durante la marea baja. A la izquierda, parte del dique sumergido y al fondo a la derecha el dique de la margen portuguesa.

El Banco do O'Bril existe al menos desde 1648 y tenía un carácter cíclico como describen Weiholtz (1978) y Morales (1997). Este ciclo consistía en lo siguiente: el banco crece en el transcurso de algunas décadas en la margen occidental del Estuario del Guadiana, girando hacia el este hasta la parte distal del banco y bloqueando así parcialmente la boca del estuario. Posteriormente, se forma un nuevo canal en el río cerca de la margen occidental y dividiendo el banco en dos o más segmentos. Este canal se va ampliando con el tiempo, iniciando una migración hacia la margen oriental del estuario, uniéndose finalmente al este, en la costa española (Figuras 2-5 y 2-6). De este modo se producía un transporte litoral de sedimentos de oeste a este.

En 1876, cuando el Banco do O'Bril se encontraba al final de este ciclo se produjo la mayor inundación del río Guadiana, lo que provocó la destrucción de gran parte del banco. En ese momento el banco contaba con un área de 0.8 km² solo en la parte portuguesa y 2.7 km² incluyendo la parte española.

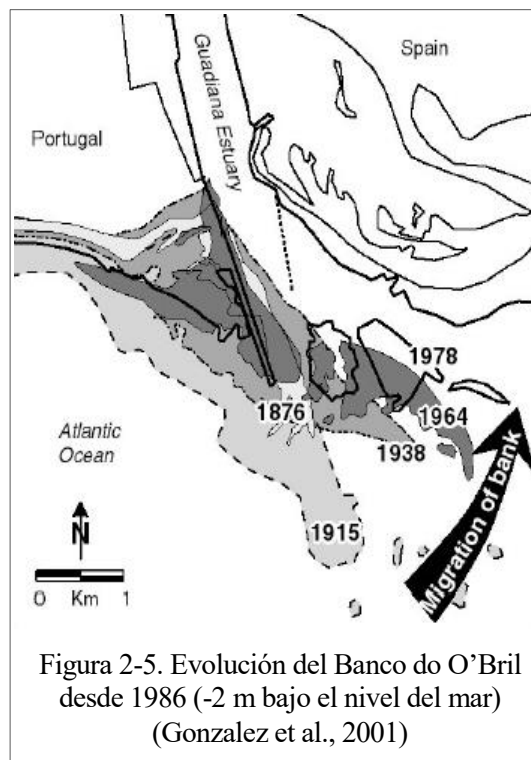


Figura 2-5. Evolución del Banco do O'Bril desde 1876 (-2 m bajo el nivel del mar) (Gonzalez et al., 2001)

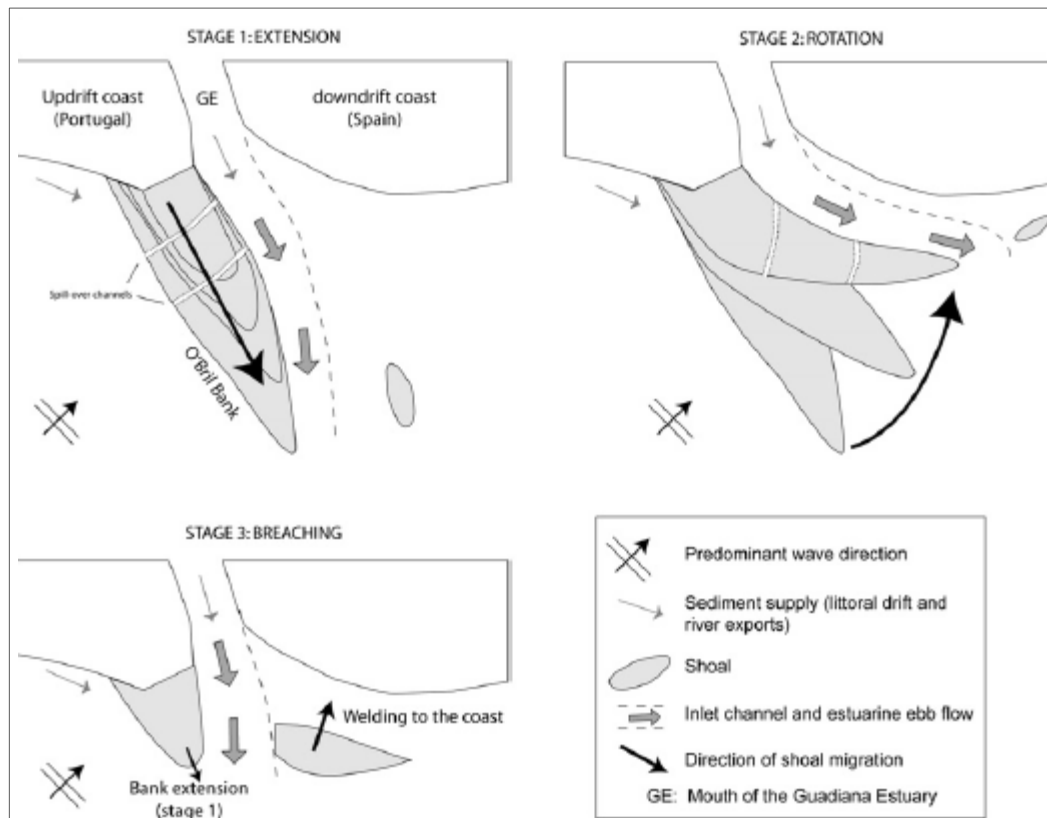


Figura 2-6. Estadios del ciclo del Banco do O'Bril (Garel et al., 2011)

Después de esto el banco sufre algunas modificaciones como la de 1915, en la que se reconstituye con 3.7 km^2 en Portugal y 5.9 km^2 en total. A partir de este punto el Banco do O'Bril empieza a perder área, disminuyendo unos $48 \text{ m}^2/\text{año}$. Al mismo tiempo empieza a girar hacia el norte, proceso que fue acelerado por la construcción en 1972 y 1974 de los muelles anteriormente citados. En 1978, el banco se encuentra en su peor momento, con una superficie inferior a la resultante de la inundación de 1876, con un área de 0.6 km^2 en Portugal y 1.3 km^2 en total (Figura 2-7).

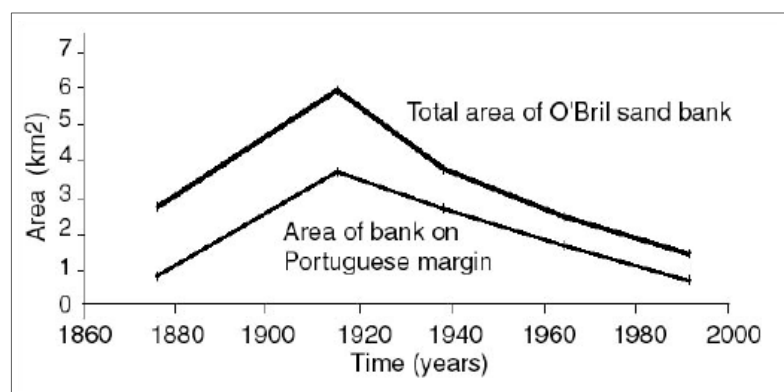


Figura 2-7. Evolución del área del Banco do O'Bril entre 1876 y 1978 (Gonzalez et al., 2001)

A raíz de la construcción de ambos diques, se inicia un proceso distinto en cada una de las márgenes. En el caso de la margen portuguesa, se inicia una rápida acumulación de arena contra el dique de unos 120000 m^2 entre 1974 y 1980. La arena continuó acumulándose rápidamente en las proximidades del malecón hasta 1986. Cuando se rellenó el área contra el dique, las arenas se depositaron hacia el oeste en la costa adyacente (Figura 2-8).

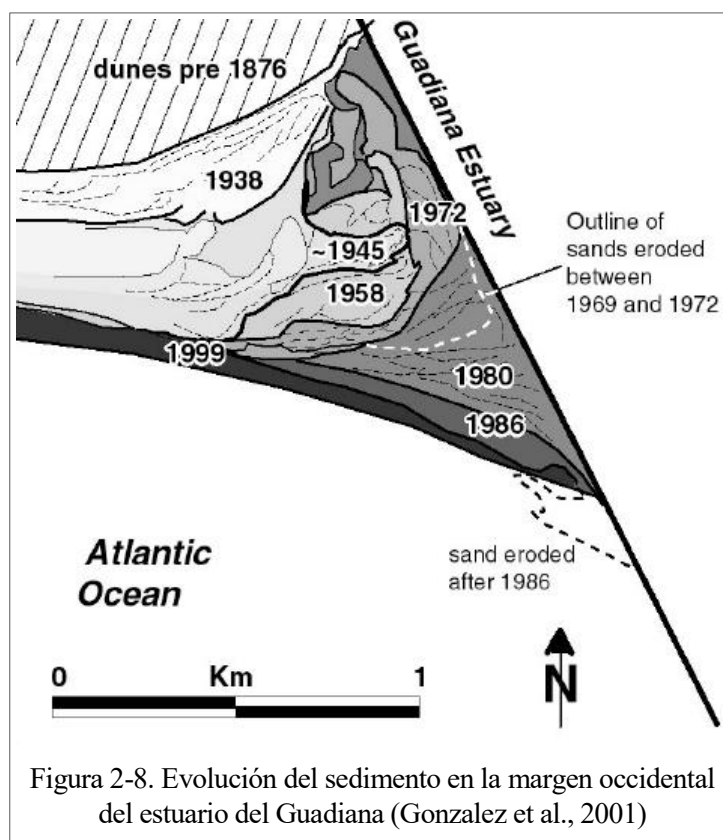


Figura 2-8. Evolución del sedimento en la margen occidental del estuario del Guadiana (Gonzalez et al., 2001)

Sin embargo, las consecuencias en el este del estuario difieren de manera notable. El efecto del dique en la margen del este no es tan drástico como el que se ve en la parte occidental del estuario. Esto contrasta con el litoral más al este, donde la erosión costera es un problema conocido, y que podría estar relacionado con la construcción de los diques y el subsiguiente agotamiento de arena (Gonzalez et al., 2000).

Mientras que la margen occidental muestra la acumulación de arena referida con anterioridad, la margen española sufre erosión (Figura 2-9 a). La acumulación local en esta margen se debe a las áreas cercanas al dique sumergido, acumulándose la arena contra este, pero en su lado más occidental.

La acumulación promedio en la margen occidental está en el rango de 7-10 m/año, con excepción del área cercana al dique, donde las tasas alcanzan un pico de alrededor de 50 m/año. Esta área tiene una extensión de alrededor de 450 m a partir de la cual los valores caen rápidamente. La tendencia erosiva en la margen oriental muestra

valores relativamente moderados de alrededor de -3 m / año, a excepción de unos 200 m al lado del canal principal del estuario, donde la erosión promedio es de hasta -15 m/año (Figura 2-9 a).

En resumen, en los últimos 160 años, el estuario del Guadiana ha sufrido grandes cambios, causados principalmente por la construcción de grandes presas en su cuenca hidrográfica entre 1955 y 1965 con la consiguiente retención de sedimentos, un aumento de la erosión del suelo debido a la deforestación en los años 30 y 40 del siglo XX y por la rectificación del canal mediante la construcción de los diques en 1972 y 1974. Debido a estos cambios, se reduce el área del Banco do O'Bril, así como su aporte de arena a las costas españolas.

La margen occidental del estuario se propagó en un promedio de 950 m, lo que resultó en un aumento de área de 1.15 km² entre 1870 y 1999, acumulando aproximadamente 1.000.000m³ de arena, que corresponden a 180.000 m³/año, o el total estimado de la deriva litoral.

En la margen oriental se desarrolló un sistema de marismas, protegido por un sistema de isla barrera. Aunque la costa de la isla se erosionó ligeramente hasta 1969, se ha mantenido relativamente estable desde entonces. El área analizada del margen oriental creció en un total de 340.000 m² desde 1956, principalmente a través del crecimiento de la marisma y los canales de marea asociados al canal estuarino principal. Este desarrollo probablemente solo fue posible debido a la regulación continua del flujo del río a través de presas y diques desde mediados de los años cincuenta, lo que provocó la ausencia de crecidas repentinas anuales que limpiasen el lecho del río de sedimentos.

Desde su construcción, el sistema de diques ha sido culpado, junto con represas en la cuenca del río, de una mayor vulnerabilidad costera a lo largo de la Isla Canela (Gonzalez et al., 2001; Garel y Ferreira, 2011). El problema de la erosión es especialmente visible en la parte central de la isla, donde las presiones antropogénicas impulsadas por el turismo en la playa han motivado la implementación de diversas medidas de defensa costera desde mediados de los años noventa.

En 2010, el lóbulo exterior del delta se encontraba erosionado casi por completo, dando como resultado un delta más simétrico con una mayor profundidad del agua en general (Figura 2-10). En contraste, el banco migró más hacia el mar y volviéndose más desarrollado y menos profundo (profundidad del agua de -2m, referido al nivel del mar), lo que representa una amenaza para la navegación.

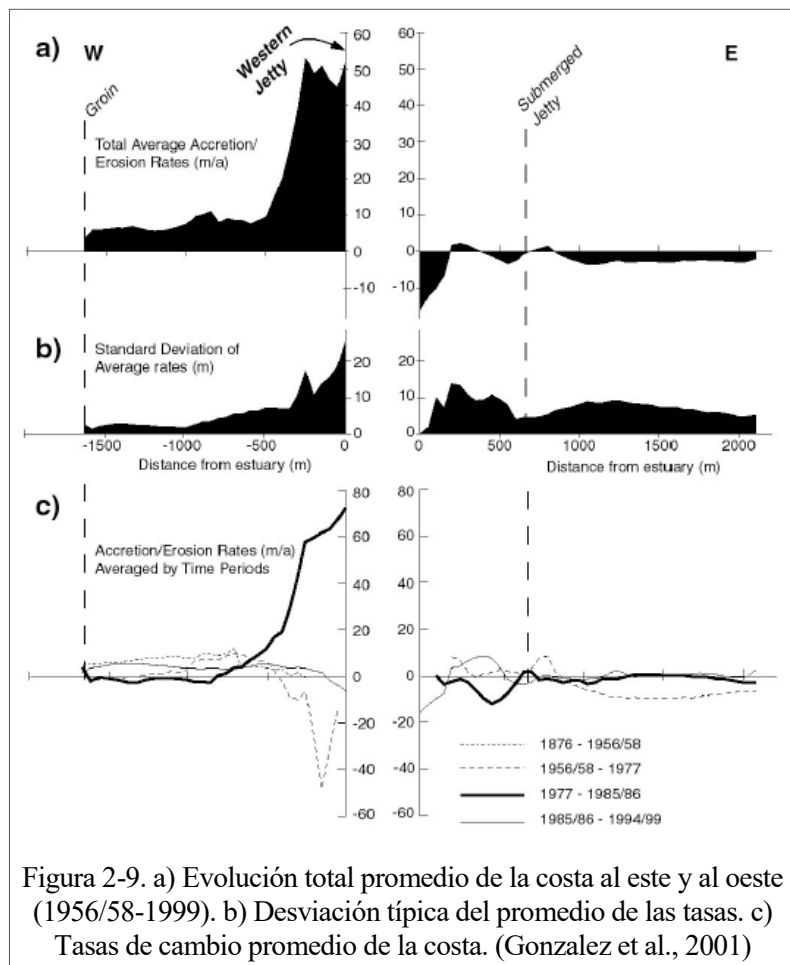


Figura 2-9. a) Evolución total promedio de la costa al este y al oeste (1956/58-1999). b) Desviación típica del promedio de las tasas. c) Tasas de cambio promedio de la costa. (Gonzalez et al., 2001)

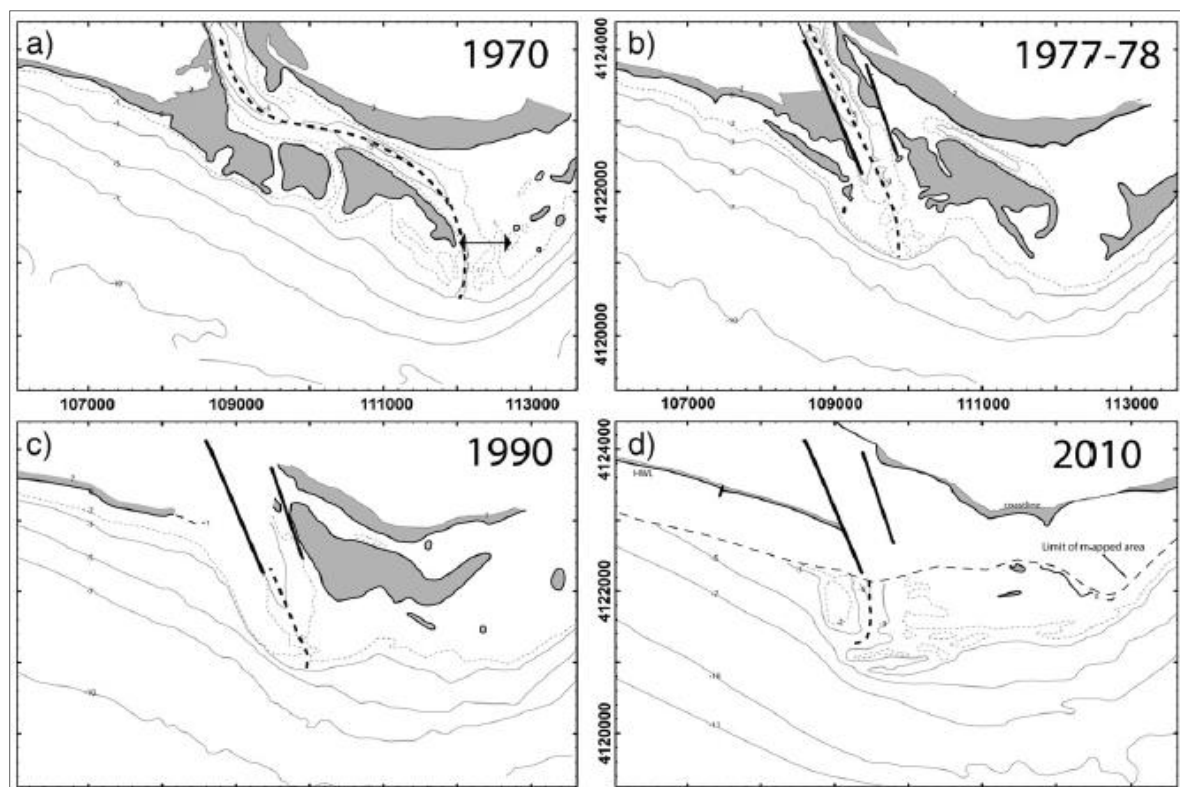


Figura 2-10. Evolución batimétrica del delta entre 1970 y 2010. (Garel et al., 2011)

En cuanto a erosión se refiere, la costa se mantuvo estable en el sector central entre 1956 y 1977, y luego se erosionó a una tasa de 3,5 m/año hasta 1994. Esta marcada erosión en el sector central ha sido detenida por una serie de obras de ingeniería, y en particular la construcción de una protección de escolleras entre 1996 y 2000 (Figura 2-11).

El sector oriental experimentó un avance costero de 230m entre 1977 y 2000, después de la construcción del muelle.

Y se produce una gran acumulación de arena contra el dique de Carreras (Figura 2-12) en Punta del Moral (construido en 1978), debido al transporte litoral de oeste a este.



Figura 2-11. Protección de escollera frente a urbanizaciones en Isla Canela. (MAGRAMA)



Figura 2-12. Acumulación contra el dique de Punta del Moral. (MAGRAMA)

2.2. Situación actual

En 2013, la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar publica un informe titulado ‘Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir’. En uno de sus capítulos dicho texto se refiere expresamente a la costa de Isla Canela señalando los dos problemas principales que influyen o influyeron en esta costa:

- 1) El obstáculo al transporte de sedimentos que supuso la construcción del dique de encauzamiento de la margen portuguesa del río Guadiana cuyas transformaciones han impedido el flujo directo natural del sedimento a través de la desembocadura a la playa.
- 2) La disminución de aportes del propio río Guadiana.

En este trabajo solo se analiza la evolución de la costa debida a los distintos forzamientos climáticos, sin tener en cuenta las aportaciones del río Guadiana que se recomienda incluir en futuras líneas de investigación.

El déficit sedimentario provocado por ambas causas es lo que ha configurado el retroceso de la playa de la zona con el consiguiente problema, sobre todo en las zonas con urbanizaciones consolidadas.

En la actualidad, a este problema inicial de déficit sedimentario se suma la distribución de los bajos que aparecen en la desembocadura – básicamente en forma de barras – que en su evolución hacen que varíen las zonas más céntricas, según el grado de aproximación de la línea de orilla, que son hoy en día el tramo más crítico de la playa.

Este déficit sedimentario trasciende incluso al entorno de Isla Canela; propagándose en dirección oeste-este y

afectando a otros tramos cercanos. Consideran, por tanto, que cualquier actuación debe recuperar y mejorar el sistema actual del entorno, teniendo en cuenta el déficit sedimentario de varias décadas.

La evolución de todo el frente de levante de la desembocadura del río Guadiana, formado por la playa de Isla Canela viene condicionada por los bajos del actual delta sumergido del río.

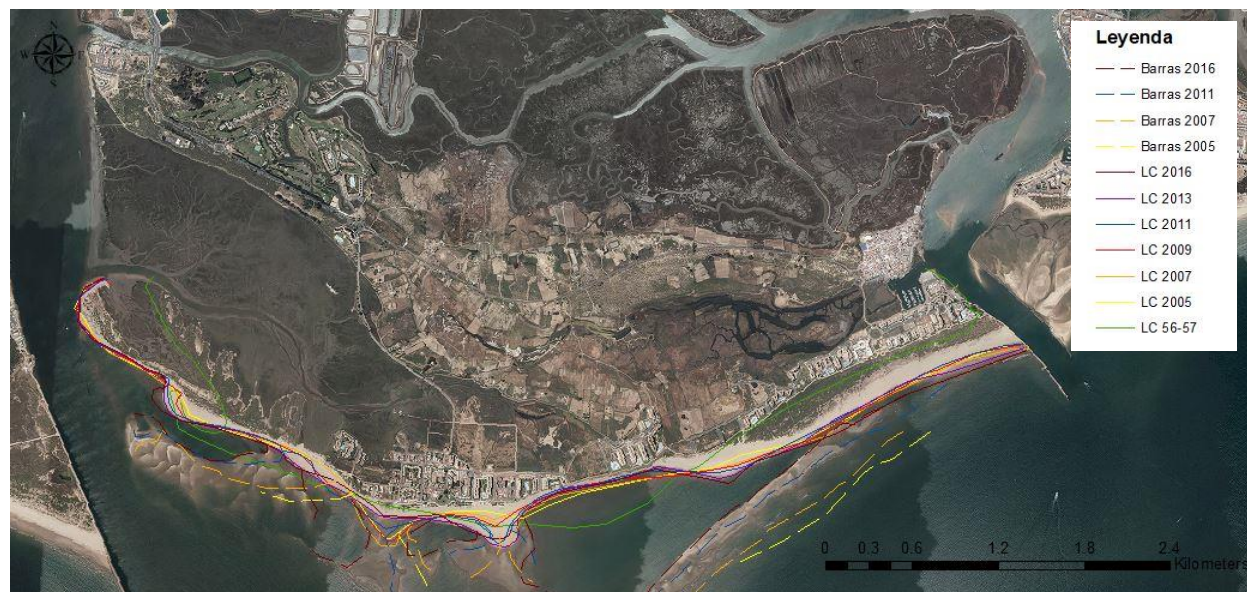


Figura 2-13. Evolución de la línea de costa y de las barras. (Datos Espaciales de Referencia de Andalucía, ArcMap)

Como se observa en la figura 2-13 las barras van emergiendo y forman el delta sumergido de la desembocadura del río, lo que hace que la energía de oleaje que incide directamente a lo largo de la playa sea dispar, con puntos donde las barras producen mayor disipación de energía y en otros lugares donde el amortiguamiento es reducido. Estas barras además se van desplazando y acercando a la costa actual, incrementando esta disparidad en la incidencia de la energía de oleaje. Actualmente se han formados dos tómbolos a resguardo de las barras. Comparando la línea de 2004 y de 2011 (Figura 2-14) se observa que el incremento de superficie en ambos tómbolos es superior a las pérdidas que se producen en el tramo de playa comprendido entre los mismos.

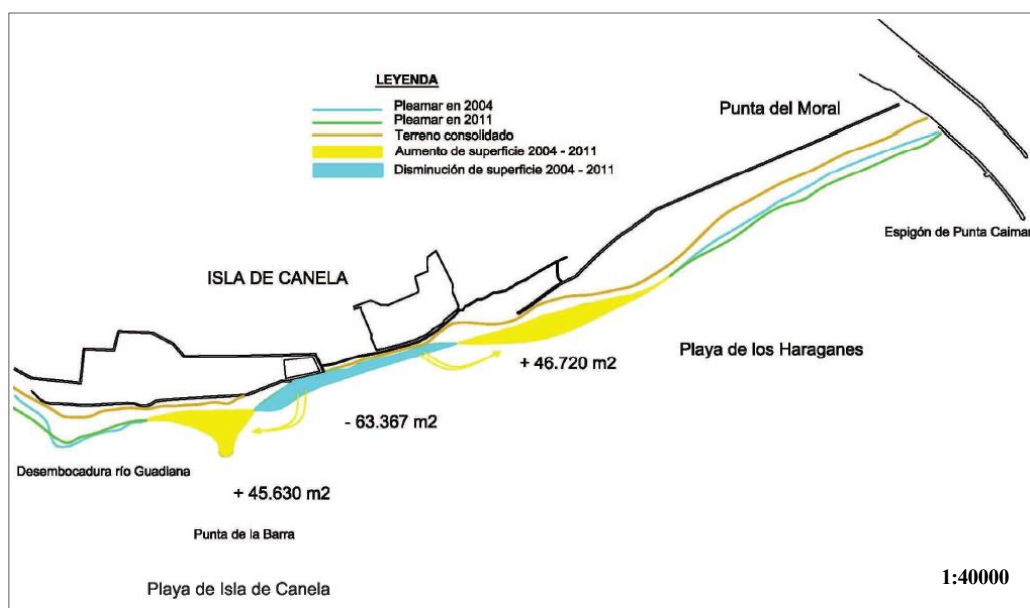


Figura 2-14. Variación de superficie de playa en pleamar entre los años 2004 y 2011 en la playa de Isla Canela (MAGRAMA, 2013)

El cambio morfológico que sufre la línea de orilla entre 2004 y 2011 debido a la descompensación que las barras producen en la incidencia de la energía de oleaje, se aprecia muy claramente en la figura 2-15, en la que se aprecian unas ondulaciones en la línea de orilla de la playa de Isla Canela. Una de las zonas de mayor riesgo es la que está frente a una de las urbanizaciones, donde la erosión llega casi a sus puertas. Ante esta situación cualquier temporal que incida sobre la playa es susceptible de producir daños a propiedades e invadir terrenos consolidados. En estas circunstancias, las alternativas de actuación debieran obedecer a dos premisas:

- Defensa del tramo de costa en peligro hoy en día.
- Tener en cuenta que esta costa va a cambiar en un periodo de tiempo relativamente corto.



Figura 2-15. Frente costero de Isla Canela (2016) y zonas urbanizadas con riesgo

2.3. Actuaciones futuras

En vista de lo expuesto con anterioridad el Ministerio estudia 3 alternativas y una alternativa 0 de no actuación.

La ‘**Alternativa 0**’ fue descartada por los inconvenientes que presenta, descompensación energética y sedimentaria en aumento, lo que provocaría una llegada de oleaje reducido, las urbanizaciones se verían afectadas y dañadas, se producirían invasiones marinas en terrenos consolidados y la playa tendría anchuras desiguales pasando de cientos de metros a 0.

La ‘**Alternativa 1**’, consiste en el movimiento de arena de las zonas acumulativas hacia los tramos erosionados (unos 900 m) y restituir así la costa de 2004 (Figura 2-16).

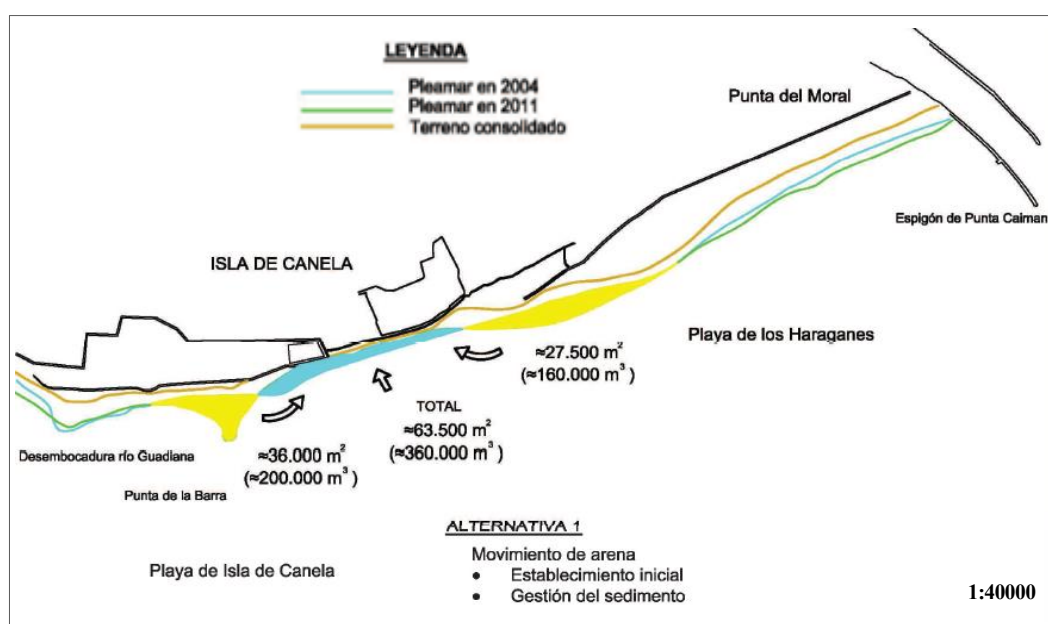


Figura 2-16. Alternativa 1 – Movimiento de la arena (MAGRAMA, 2013)

Sin embargo, esta alternativa requiere cierta periodicidad y un control de la línea de costa, así como una gestión

del sedimento.

Para la '**Alternativa 2**' se plantea la protección del terreno consolidado frente a la zona erosionada cercana a las urbanizaciones en riesgo mediante un dique o un revestimiento longitudinal en los 900 m entre el tómbolo y el hemitómbolo con el fin de que resista los embates del mar durante los temporales y con una vida útil lo suficientemente larga como para que se forme una playa frente a la obra (Figura 2-17).

Esta alternativa presenta un impacto medioambiental importante, tanto respecto al paisaje como respecto a la función que cumple el litoral en la zona.

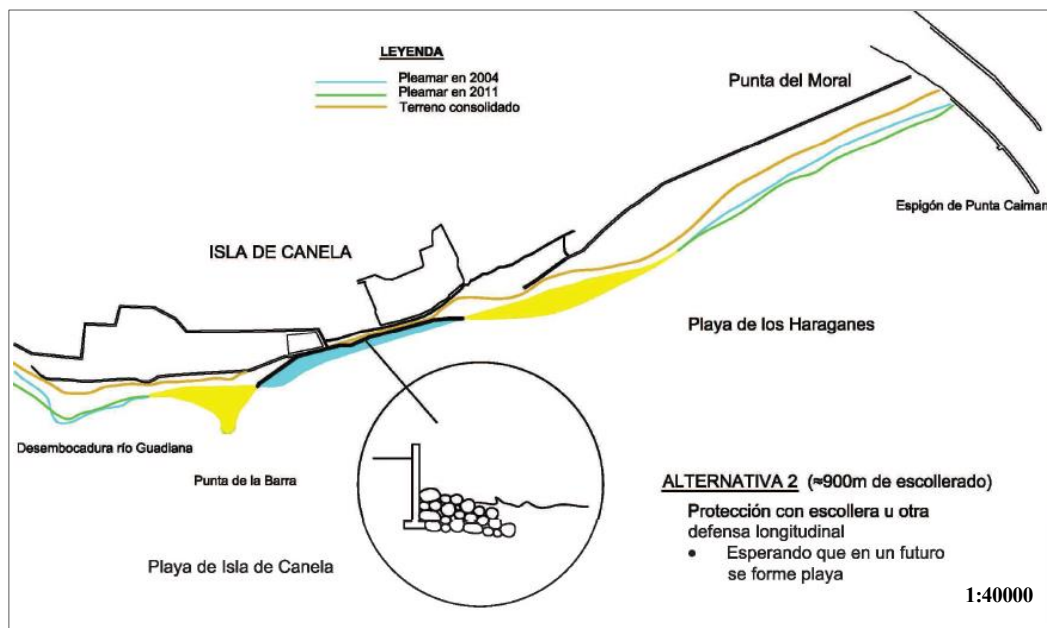


Figura 2-17. Alternativa 2 – Protección de la zona en riesgo (MAGRAMA, 2013)

No es de esperar que, con esta actuación, la erosión se traslade a levante o a poniente, dado que la pérdida de sedimento está localizada, absorbida por ambos extremos que funcionan como apoyos. Por ello no parece que el dique longitudinal produzca más efectos que el propio paisajístico y de falta de playa; salvo que, con la acción del oleaje, en temporales se produzcan socavamientos frente a su pie.

Como '**Alternativa 3**' se plantea la construcción de dos espigones cortos y la recarga de arena mediante el movimiento de arena ya mencionado anteriormente para restituir a línea de costa de 2004 (Figura 2-18).

De esta forma se intenta paliar los problemas de fuga de material que presentaban las anteriores alternativas y disminuir la cantidad de arena que sería necesario reponer cada cierto tiempo.

Dado que se espera que la situación cambie, se prevé que estos espigones puedan retirarse en un futuro planteándose obras de tipo blandas, más baratas, pero con el inconveniente de ser vulnerables al vandalismo y la percepción social de poca resistencia. Los espigones además no deberían sobrepasar la bajamar viva.

Finalmente, la opción elegida por el Gobierno para paliar el daño que está sufriendo la playa es esta alternativa, la construcción de dos espigones perpendiculares a la costa, que podrán ser complementados, en su momento, con la ejecución de una serie de diques exentos cuya necesidad, tal y como especifica el documento, se valorará en función de la evolución de la playa cuando se hayan construido los espigones.

La función de los espigones es impedir el desplazamiento lateral de los sedimentos depositados en el tramo central de la isla. Los diques exentos que habrían de añadirse más adelante servirían para proteger la costa y generar una acumulación de arena.

Sin embargo, tampoco esta solución es perfecta: el equipo de técnicos que ha elaborado el proyecto advierte que la erosión seguirá produciéndose, aunque con menor intensidad, y que los diques exentos, en caso de construirse, necesitarán un mantenimiento periódico para paliar la pérdida de apoyo ocasionado por la propia erosión del fondo.

Esta opción es la más cara de todas, con una inversión de 2,5 millones de euros y un mantenimiento anual de 75.000 euros al año.

También es la que tiene un mayor impacto en la costa, dado que modifica definitivamente su forma y su funcionamiento sedimentario, aunque, como advierten en el informe, es la única garantía para disponer de la playa y proteger las propiedades e infraestructuras situadas en el litoral. El impacto ambiental, sin embargo, es muy reducido según los técnicos, y entre otras medidas, se contempla la aportación de arena terrestre procedente de la Playa de Punta del Moral, con el fin de minimizar el impacto.

En cuanto a las fases en las que se implantaría la solución adoptada por el Gobierno, el documento señala que, dado que la playa aún conserva una anchura "extraordinaria" en algunos puntos y que la intensa evolución de la batimetría impide la aplicación de los modelos de diseño habitualmente utilizados en ingeniería de costas, la recomendación es la de establecer fases diferenciadas para poder adaptar la segunda parte de la obra -la que abordaría la colocación de los diques exentos-, a la evolución que tenga la playa. Por tanto, en una primera fase se construirían los dos espigones laterales.

El documento explica la incidencia que las obras de construcción de los espigones podrían tener sobre la dinámica litoral y la costa, la flora, la calidad de las aguas, la calidad atmosférica, acústica, sobre el paisaje (la única no reversible), los Parques Naturales de la Red Natura 2000, el turismo (positiva) y los recursos pesqueros moderada, por tratarse de una zona de marisqueo.

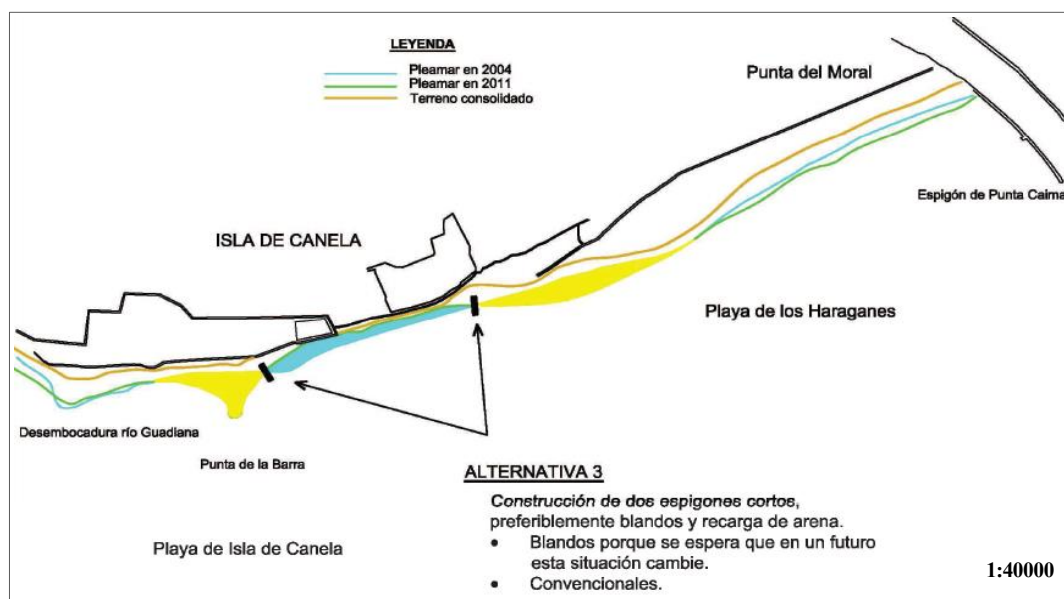


Figura 2-18. Alternativa 3 – Construcción de dos espigones cortos. (MAGRAMA, 2013)

3 METODOLOGÍA

3.1. Clima marítimo

3.1.1 Datos de partida

Los datos de partida obtenidos de Puertos del Estado tanto para la generación del modelo como para la posterior comprobación de los datos y la calibración del mismo se han obtenido de:

- Punto SIMAR 5026021 para el modelo y la selección de los temporales
- Punto SIMAR 5026023 para la comprobación de resultados y calibración del modelo
- REDMAR para los datos de viento

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son por tanto datos sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Parámetros disponibles:

- Velocidad Media del Viento (Promedio horario a 10 m. de altura)
- Dir. Media de Procedencia del Viento(0=N,90=E)
- Altura Significante Espectral
- Periodo Medio Espectral (Momentos 02)
- Periodo de Pico - Dir. Media de Procedencia de Oleaje (O=N,90= E)
- Altura Significante y Dirección Media de Mar de Viento
- Altura Significante, Periodo Medio y Dirección Media de Mar de Fondo

Para más información sobre los puntos SIMAR véase el apartado 4 y el “Apéndice A: Conjunto de datos SIMAR”.

En el análisis del clima marítimo se estudian para el oleaje:

- Descripción general en profundidades indefinidas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal o de tormenta.

Para el viento se realiza únicamente la descripción general en profundidades indefinidas.

3.1.1 Descripción general en profundidades indefinidas

En primer lugar, se representa una serie temporal de los datos de altura significativa de oleaje para el periodo de tiempo del que se tienen datos, 1956 – 2015.

Para el oleaje se obtienen los histogramas de frecuencias alimétricas para la altura significativa, el periodo pico y la dirección media de procedencia, así como los gráficos de dispersión que relacionan dichas variables entre sí. Además del grafico se ha añadido una tabla que describe la dispersión de forma numérica. Por último, se ha elaborado una rosa de oleaje.

En el caso del viento los histogramas de frecuencia serán para la velocidad del viento y su dirección media de procedencia. La grafica de dispersión y su correspondiente tabla relacionan ambas variables de viento. De nuevo

se realiza una rosa, en este caso de vientos.

Esto permite conocer los tipos de oleaje y viento más frecuentes, así como, las alturas, periodos pico, direcciones medias de procedencia de oleaje, y las velocidades y direcciones de viento que predominan en la costa de Isla Canela.

3.1.2 Régimen medio

Se puede definir como régimen medio de una serie temporal al conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar.

Si representáramos los datos en forma de histograma no acumulado, el régimen medio vendría definido por aquella banda de datos en la que se contiene la masa de probabilidad que hay entorno al máximo del histograma.

El régimen medio se describe, habitualmente, mediante una distribución teórica que ajusta dicha zona media o central del histograma. Es decir, no todos los datos participan en el proceso de estimación de los parámetros de la distribución teórica, solo lo hacen aquellos datos cuyos valores de presentación caen en la zona media del histograma.

El régimen medio, generalmente, suele representarse de una forma gráfica mediante un histograma acumulado y el correspondiente ajuste teórico, todo ello en una escala especial en la cual Weibull aparece representada como una recta.

El régimen medio está directamente relacionado con lo que se denominan condiciones medias de operatividad. Es decir, caracteriza el comportamiento probabilístico del régimen de oleaje en el que por término medio se va a desenvolver una determinada actividad influida por uno de estos agentes.

Se analiza el régimen medio para todo el registro de datos del que se dispone, este análisis incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad probabilística de tipo Weibull
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull en papel probabilístico normal

Gracias a estas funciones se puede conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola y velocidad del viento, así como su probabilidad de no excedencia.

3.1.3 Régimen extremal

Un régimen extremal de oleaje es un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo.

Se entiende por temporal aquella situación durante la cual la altura de oleaje supera un cierto umbral, se ha fijado en 3 metros en este caso, ya que es el valor que se da en menos de un 1% del tiempo. Los intervalos de tiempo que se simularán son de una semana ya que el temporal queda representado por el pico o valor máximo de altura alcanzado por el oleaje durante un periodo de 5 días, suponiendo que el tiempo mínimo que transcurre entre la aparición de dos temporales independientes es de 5 días para poder garantizar así dicha independencia estadística.

Este método de selección de temporales se conoce como Peak Over Threshold (POT) o “Picos Sobre Umbral” en español.

Se han seleccionado 4 temporales y una semana sin temporales (régimen medio) para la simulación:

- Temporal 1: Del 6 de abril de 2015 a las 00:00 al 13 de abril de 2015 a las 00:00
- Temporal 2: Del 3 de noviembre de 2012 a las 00:00 al 10 de noviembre de 2012 a las 00:00
- Temporal 3: Del 19 de noviembre de 2007 a las 00:00 al 26 de noviembre de 2007 a las 00:00
- Temporal 4: Del 25 de octubre de 2003 a las 00:00 al 1 de noviembre de 2003 a las 00:00
- Semana sin temporales: Del 15 de julio de 2014 a las 00:00 al 22 de julio de 2014 a las 00:00

Para el análisis del régimen extremal se realizan los siguientes ajustes

- Ajuste de los datos a una función de densidad probabilística de tipo Gumbel
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Gumbel

3.2. Escenarios

Se han definido 5 escenarios para la misma zona de estudio. Se ha realizado la simulación de estos escenarios en Delft3D y una vez ajustados los datos se ha realizado la comparación de los resultados. Cada uno de los escenarios se corresponde con los temporales mencionados en el anterior apartado, quedando referidos de la siguiente manera:

- Escenario 0: Semana sin temporales.
- Escenario 1: Temporal 1
- Escenario 2: Temporal 2
- Escenario 3: Temporal 3
- Escenario 4: Temporal 4

Con estos escenarios se pretenden estudiar los efectos producidos por los temporales en la costa y compararlos con los efectos de una semana en la que no se producen temporales. Los cinco casos tienen la misma batimetría y los datos de viento y oleaje correspondientes a dichos periodos de tiempo.

3.3. Modelo numérico

El software utilizado para la realización del modelo numérico es Delft3D, desarrollado por Deltares-Delft, que permite la modelación hidrodinámica a régimen no permanente del flujo en tres dimensiones. Este programa incluye los efectos de parámetros tales como las mareas, el viento, la presión atmosférica, las diferencias de densidad, el oleaje, etc. Permite la simulación del flujo en dos o tres dimensiones con o sin transporte de sedimentos y teniendo en cuenta una morfología fija o variable.

El esquema numérico de resolución es en diferencias finitas, utilizando coordenadas rectangulares o curvilíneas. Permite además la generación de un dominio de cálculo con mallas de diferentes grados de refinamiento.

Dicho programa se compone de dos módulos, FLOW y WAVE. En este caso se utilizará el segundo, el cual simula la propagación del oleaje mediante una descripción espectral.

Los pasos que se siguen con el modelo son:

- Calibración y validación del modelo
- Simulación de los distintos escenarios.

3.3.1 Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo se ha realizado una primera simulación del escenario sin temporales y se han obtenido los datos de altura significativa H_s , periodo pico T_p y dirección de oleaje en el punto donde se encuentra el punto SIMAR 5026023. Estos datos se comparan con los mismos parámetros medidos por dicho SIMAR empleando los coeficientes de correlación R y Skill y el error cuadrático medio (RMSE).

El error cuadrático medio (RMSE) mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, en otras palabras, compara su valor predicho o simulado en este caso con un valor observado o conocido.

Siendo M_n los valores medidos y S_n los valores obtenidos de la simulación:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (M_n - S_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

El coeficiente de correlación R entre M_n y S_n refleja si la gráfica de los datos procedentes de la simulación sigue la tendencia de los datos medidos por el SIMAR, es decir que ambas ascienden y descienden en los mismos puntos, y está definido por,

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (M_n - \overline{M_n})(S_n - \overline{S_n})}{\sigma_S \sigma_M} \quad (2)$$

donde, σ_S y σ_M son la desviación típica de los datos simulados y medidos respectivamente, y los datos con la línea superior, los valores medios de dichos datos. El rango de correlación estará entre 0 (mala correlación) y 1 (buena correlación).

Para el rendimiento del modelo (Skill, S) se utiliza la formulación propuesta por Wilmott (1981). Este parámetro centra su valor del error en los picos de la gráfica y refleja si los valores picos de los datos simulados son capaces de alcanzar los valores pico de los datos medidos. Si estos valores se alcanzan bien, el valor del coeficiente de Skill será bueno. El rango de este parámetro va de 0 (mal rendimiento) a 1 (buen rendimiento).

$$S = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |S_n - M_n|^2}{\sum_{n=1}^N (|S_n - \overline{M_n}|^2 + |M_n - \overline{M_n}|^2)} \quad (3)$$

El procedimiento seguido para la calibración es el siguiente:

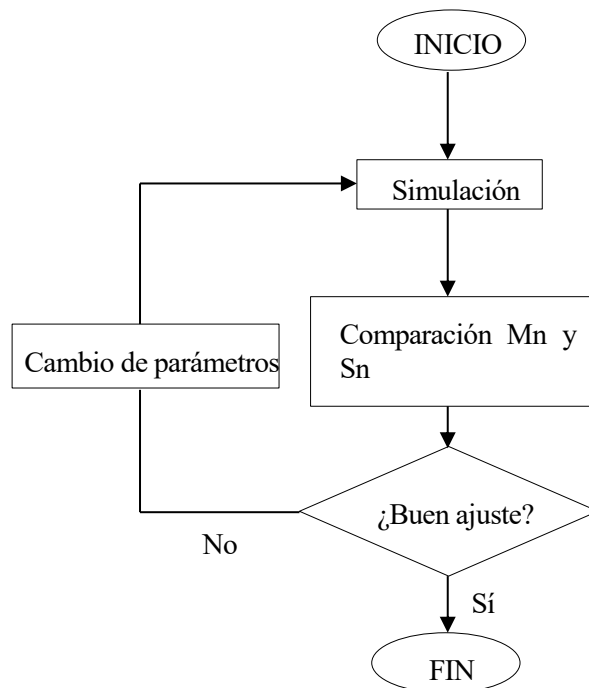


Figura 3-1. Procedimiento de calibración del modelo

El parámetro que se irá variando es el parámetro de Collins que evalúa la disipación espectral del oleaje debido a la fricción con el fondo. Se considera que el ajuste es bueno cuando el valor de R esté entre 0,7 y 0,8. Una vez alcanzado un buen ajuste se varía el parámetro y se repiten las simulaciones para comprobar si mejoran respecto a las anteriores. Una vez seleccionado el valor de Collins que de un mejor ajuste entre los datos simulados y los medidos por el punto SIMAR 5026023, el modelo quedará calibrado y validado.

3.3.2 Análisis de régimen medio y régimen extremal

Se calcula el régimen en cada escenario para poder analizar los efectos de cada uno de ellos sobre la morfodinámica de la costa. El procedimiento seguido es el siguiente:

- 1- Una vez realizada la simulación, se exportan los datos de H_s , T_p en formato Matlab.
- 2- Se seleccionan 5 puntos cercanos a la costa y además se sacan 5 perfiles transversales a la misma.
- 3- Una vez obtenidos los datos y las coordenadas xyz de los puntos se programa una rutina en Matlab que, para cada caso:
 - Lea los archivos de salida del programa (estados de mar propagados)
 - Interpole H_s y T_p en el perfil.
 - Calcule la altura de rotura y la tasa de transporte de sedimentos según la fórmula del CERC para cada perfil.
 - Genere el histograma de frecuencias altimétricas, la función de densidad de Weibull y la resultante media anual en el punto de control.
 - Repita el proceso para todos los puntos de control dónde se desee realizar el análisis.

4 CLIMA MARÍTIMO

4.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio

Como se dijo anteriormente, los datos para el estudio del clima marítimo y para la calibración del modelo de la Costa de Isla Canela se han obtenido del punto SIMAR 5026021, del punto SIMAR 5026023 y de la REDMAR. La localización de los puntos SIMAR puede verse en las figuras 4-1, 4-2 y 4-3. Para más información sobre el funcionamiento de estos puntos véase el “Apéndice A: Conjunto de datos SIMAR”.

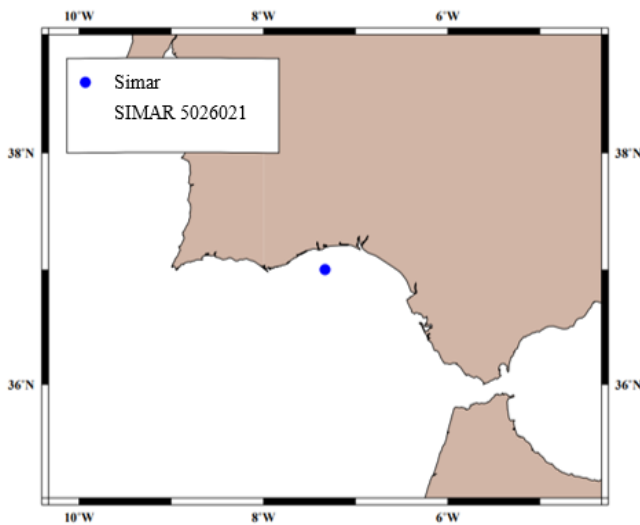


Figura 4-1. Localización SIMAR 5026021

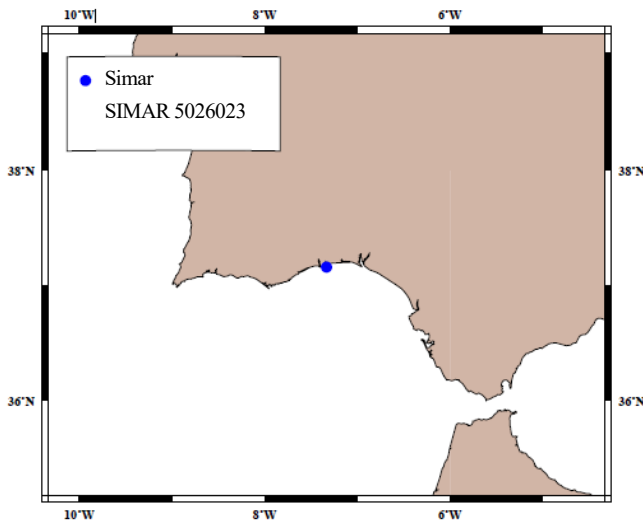


Figura 4-2. Localización SIMAR 5026023

- Conjunto de Datos: SIMAR
- Nodo: **SIMAR 5026021**
- Longitud: -7.333 E
- Latitud: 37.000 N
- Profundidad: INDEFINIDA

- Conjunto de Datos: SIMAR
- Nodo: **SIMAR 5026023**
- Longitud: -7.333 E
- Latitud: 37.167 N
- Profundidad: INDEFINIDA



Figura 4-3. Distancia entre puntos SIMAR

4.2. Oleaje

Solo se ha realizado el estudio de clima marítimo con los datos procedentes del punto SIMAR 5026021, del cual se han obtenido los datos para la simulación.

4.2.1 Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

En esta descripción se muestra:

- Serie temporal de oleaje desde 1958 hasta el 2015.
- Gráficos de dispersión: H_S-T_P que representa la altura significativa respecto al periodo pico, H_S-Dir que representa la altura significativa frente a la dirección de procedencia del oleaje y $Dir-T_P$ que representa la dirección de procedencia del oleaje frente al periodo pico.
- Tablas de dispersión representando los diagramas de dispersión anteriores de forma numérica.
- Rosa de oleaje.

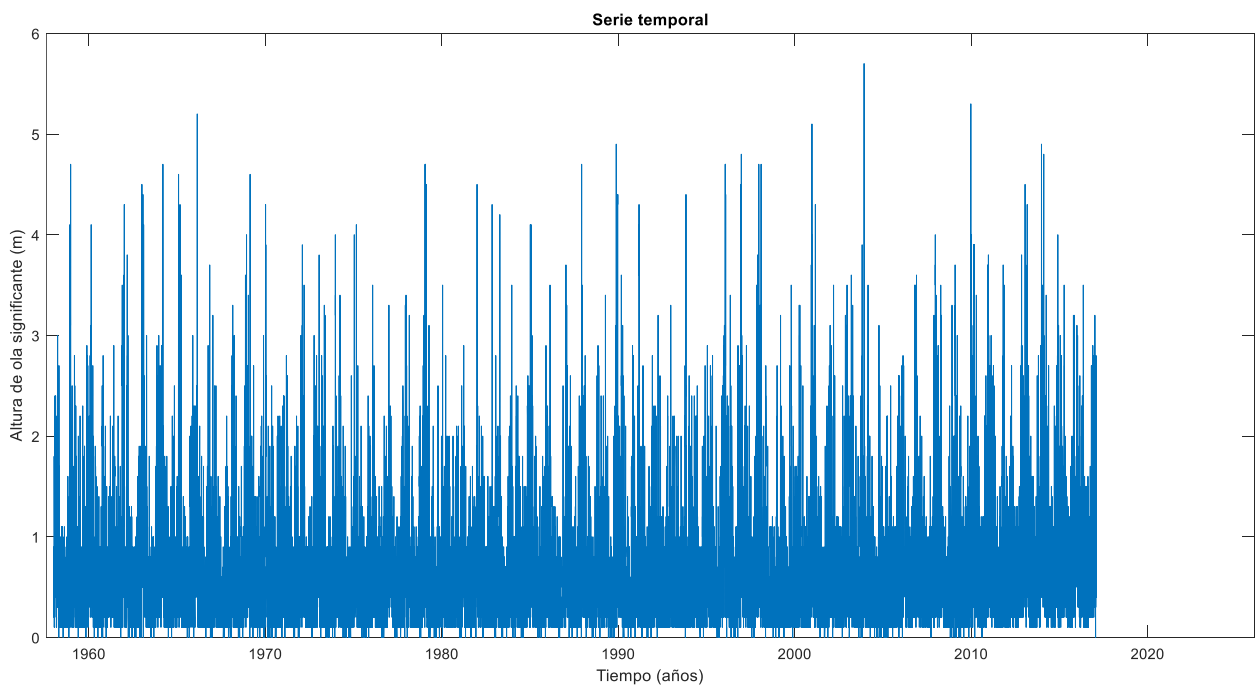


Figura 4-4. Serie temporal de altura significativa de ola

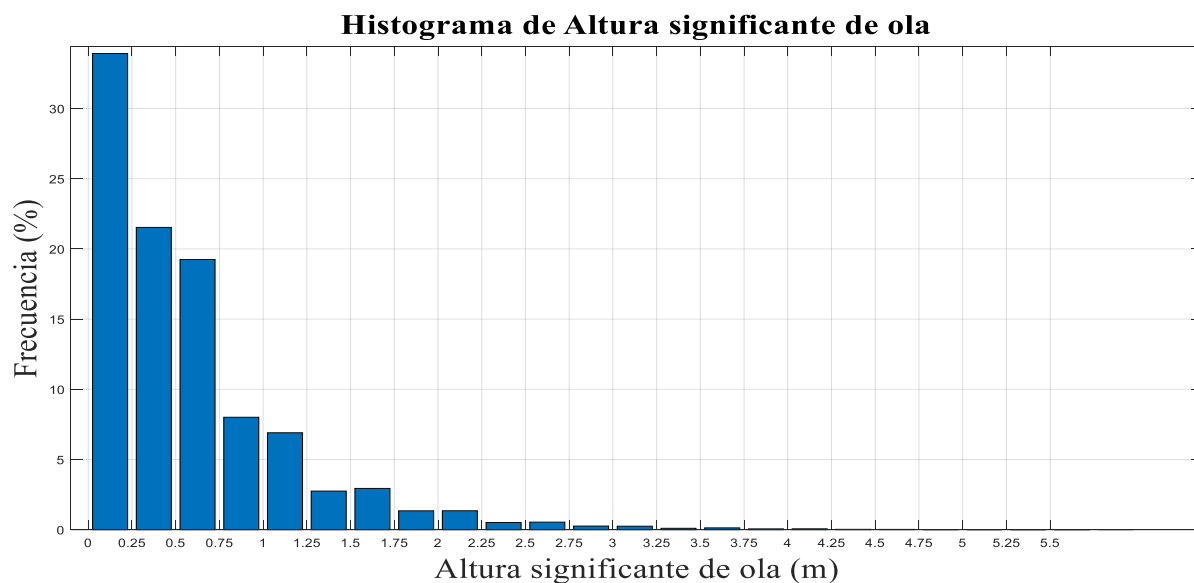


Figura 4-5. Histograma de altura significativa de ola

Tabla 4-1. Frecuencias de alturas de ola

Hs (m)	Frecuencia (%)	Hs (m)	Frecuencia (%)
0 – 0,25	33,92	2 – 2,25	1,349
0,25 – 0,5	21,54	2,25 – 2,5	0,5147
0,5 – 0,75	19,25	2,5 – 2,75	0,5402
0,75 – 1	8,012	2,75 – 3	0,2607
1 – 1,25	6,906	3 – 3,25	0,2511
1,25 – 1,5	2,753	3,25 – 3,5	0,102
1,5 – 1,75	2,943	3,5 – 3,75	0,131
1,75 – 2	1,345	3,75 – 4	0

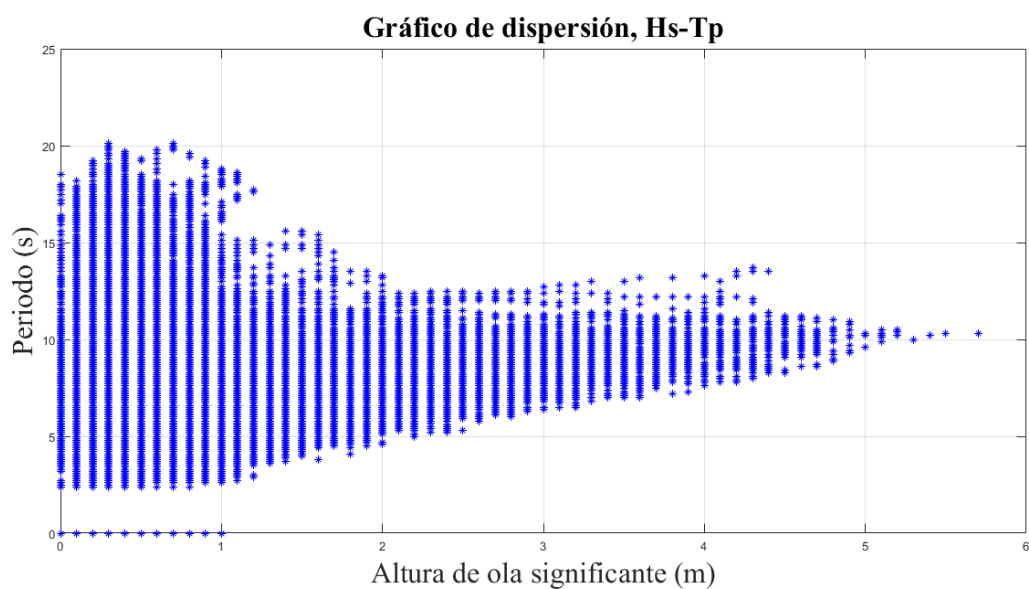


Figura 4-6. Gráfico de dispersión Hs - Tp

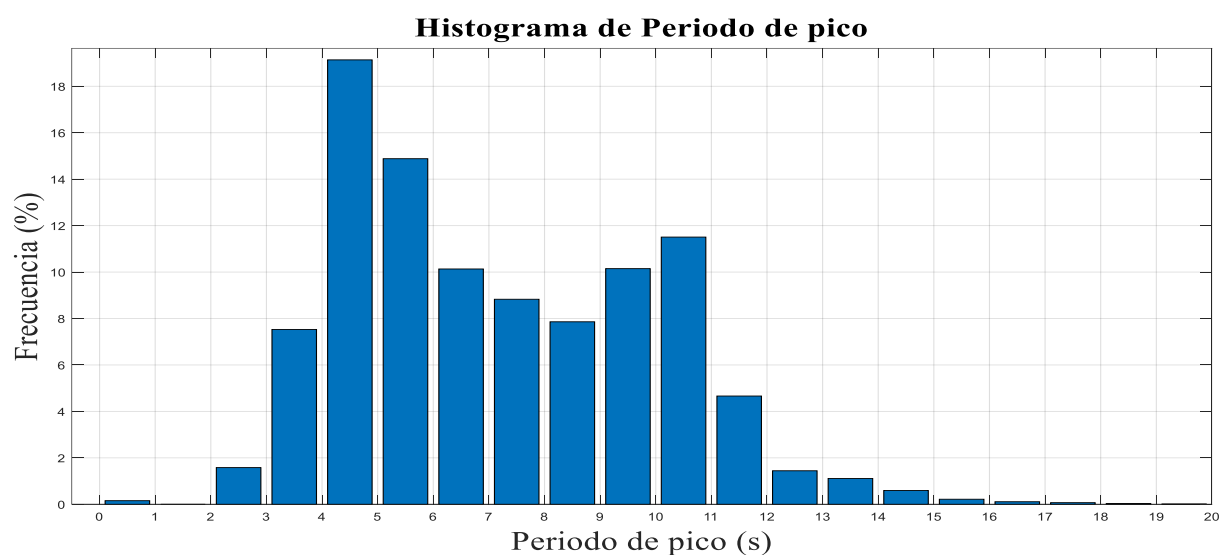


Figura 4-7. Histograma de periodo pico

Tabla 4-3. Frecuencias de periodo pico

Tp (s)	Frecuencia (%)	Tp (s)	Frecuencia (%)
0 – 1	0,1547	9 – 10	10,15
1 – 2	0	10 – 11	11,51
2 – 3	1,58	11 – 12	4,662
3 – 4	7,529	12 – 13	1,443
4 – 5	19,14	13 – 14	1,113
5 – 6	14,88	14 – 15	0,5937
6 – 7	10,13	15 – 16	0,2176
7 – 8	8,829	16 – 17	0,1094
8 – 9	7,859	17 – 18	0,06891

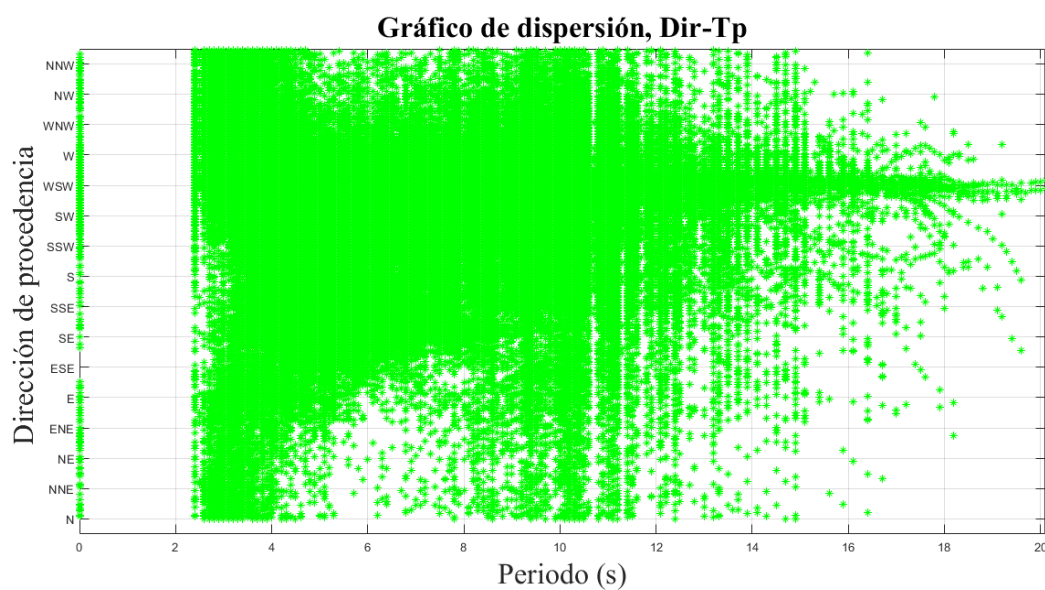


Figura 4-8. Gráfico de dispersión Dir –Tp

Tabla 4-4. Tabla de dispersión Tp - Dir

Tp(s)	Periodo pico - Dirección media de procedencia															
	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
	Dirección media de procedencia (°)															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.08	0.02	0	0.01
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.13	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.41	0.13	0.16	0.26
3	0.3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.19	0.12	0.34	0.46	0.19	0.21	0.63	3.17	0.5	0.25	0.4
4	0.04	0.01	0.02	0.03	0.03	0.09	0.13	4.42	3.12	0.71	0.55	1.07	5.26	3.34	0.2	0.07
5	0	0	0	0	0.01	0.04	0.14	6.59	1.66	0.3	0.4	1.33	3.27	1.05	0.05	0.02
6	0	0	0	0	0.01	0.01	0.05	2.55	0.42	0.19	0.37	1.68	3.48	1.28	0.06	0.03
7	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0.86	0.2	0.2	0.38	1.6	3.28	2.11	0.09	0.04
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.16	0.11	0.19	0.32	1.19	2.67	2.94	0.13	0.05
9	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.05	0.06	0.15	0.24	0.35	0.97	2.98	4.9	0.21	0.09
10	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.07	0.07	0.22	0.29	0.3	0.71	3.18	6.13	0.25	0.1
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.08	0.12	0.14	0.26	1.68	2.08	0.1	0.04
12	0	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.11	0.74	0.35	0.02	0.01
13	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.07	0.55	0.34	0.02	0.01
14	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.27	0.21	0.01	0.01
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.12	0.05	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0.01	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.05	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
TOTAL	0.55	0.19	0.16	0.22	0.52	0.69	15.12	6.49	2.54	3.17	9.76	31.29	25.44	1.55	1.14	1.07

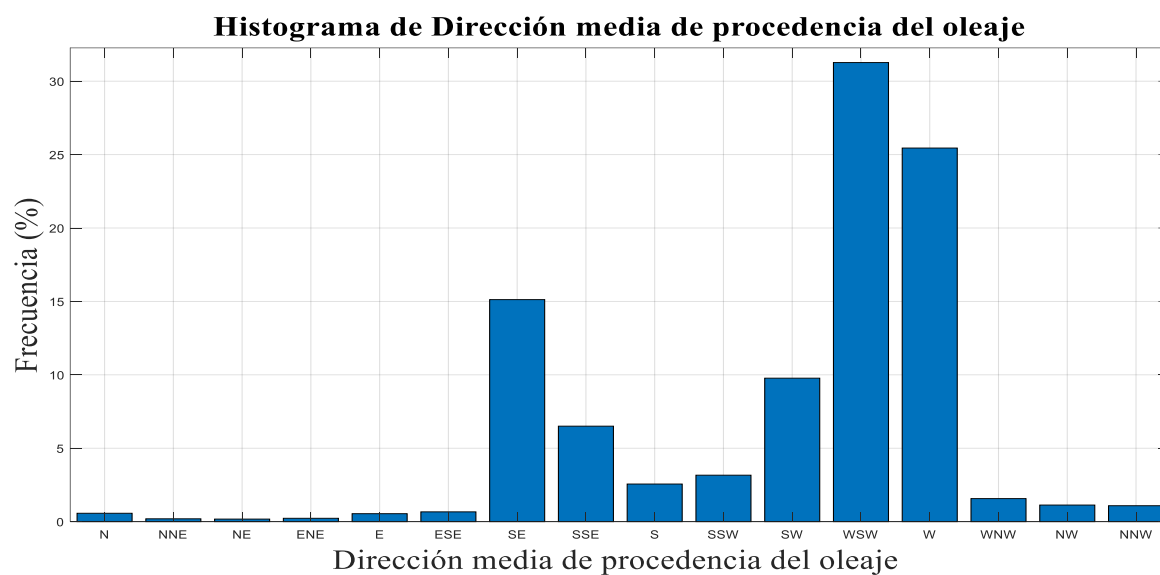


Figura 4-9. Histograma de dirección media de procedencia

Tabla 4-5. Frecuencias de dirección

Dir (°)	Frecuencia (%)	Dir (°)	Frecuencia (%)
N	0,5714	S	2,562
NNE	0,1926	SSW	3,165
NE	0,1748	SW	9,773
ENE	0,2292	WSW	31,27
E	0,541	W	25,45
ESE	0,6663	WNW	1,568
SE	15,12	NW	1,131
SSE	6,504	NNW	1,084

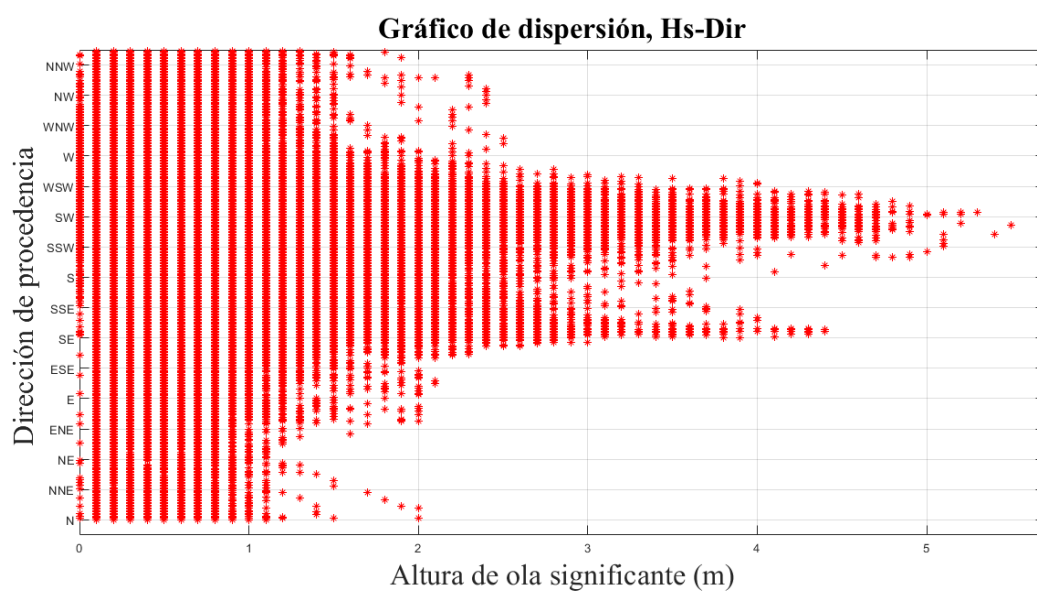


Figura 4-10. Gráfico de dispersión Hs - Dir

Tabla 4-6. Tabla de dispersión Hs - Dir

Altura significativa - Dirección media de procedencia																		
Hs(m)	Dirección media de procedencia (°)																	
	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	TOTAL	
0	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	1.22	1.53	0.83	0.83	1.4	8.54	17.68	0.9	0.34	0.15	33.91
1	0.1	0.04	0.02	0.02	0.04	0.11	0.16	2.66	1.64	0.6	0.54	1.14	7.87	5.99	0.22	0.2	0.22	21.55
2	0.25	0.07	0.06	0.06	0.09	0.2	0.19	3.98	1.61	0.45	0.51	1.39	7.94	1.42	0.27	0.38	0.47	19.28
3	0.11	0.02	0.03	0.03	0.03	0.07	0.09	2.32	0.63	0.17	0.25	0.95	2.73	0.17	0.11	0.15	0.17	8
4	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	2.33	0.48	0.2	0.3	1.15	2.05	0.1	0.05	0.05	0.06	6.92
5	0.01	0	0	0	0	0.01	0.02	0.89	0.2	0.09	0.15	0.67	0.67	0.03	0.01	0.01	0.01	2.77
6	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.86	0.2	0.09	0.17	0.88	0.67	0.03	0	0	0	2.92
7	0	0	0	0	0	0	0	0.32	0.07	0.05	0.1	0.48	0.3	0.01	0	0	0	1.33
8	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.07	0.05	0.11	0.55	0.26	0.01	0	0	0	1.35
9	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.02	0.01	0.05	0.25	0.09	0	0	0	0	0.51
10	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.03	0.01	0.06	0.27	0.08	0	0	0	0	0.54
11	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0	0.03	0.16	0.03	0	0	0	0	0.25
12	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0	0.03	0.17	0.03	0	0	0	0	0.26
13	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0.07	0.01	0	0	0	0	0.1
14	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0.1	0.01	0	0	0	0	0.13
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.05
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.05	0	0	0	0	0	0.06
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.02
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.02
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0.58	0.2	0.17	0.22	0.54	0.67	15.12	6.5	2.55	3.16	9.77	31.28	25.44	1.56	1.13	1.08		

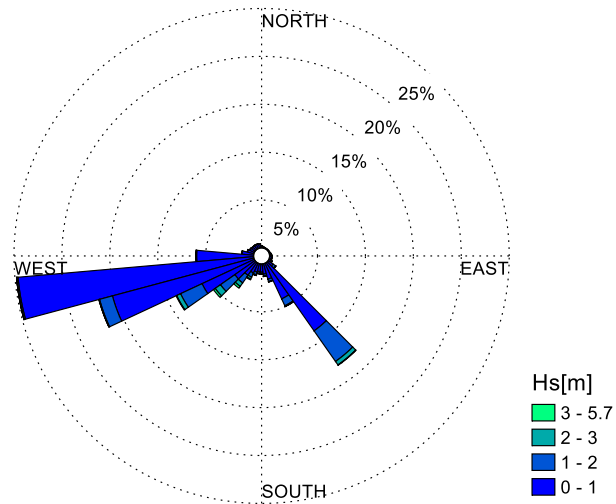


Figura 4-11. Rosa de oleaje SIMAR 5026021

4.2.1.1 Resumen de resultados

De la descripción general de oleaje en profundidades indefinidas se pueden resaltar los siguientes resultados:

- Rango de alturas significante de oleaje: 0 – 3,75 m
- Alturas de ola más frecuentes: 0 – 0,5 m
- Rango de periodos picos: 0 – 18 s
- Periodos pico más frecuentes: 4 – 6 s
- Direcciones medias de procedencia más frecuentes entre Oeste y Sur

4.2.2 Régimen medio anual de H_s en profundidades indefinidas

El régimen medio de la altura de ola significativa H_s se ajusta a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene definida por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0,\infty)}(x) \quad (4)$$

En la tabla 4-7 se muestran los parámetros de ajuste del régimen medio de altura de ola obtenidos según la distribución de Weibull.

Tabla 4-7. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio

Parámetros	
a	0,6731
b	1,3612

Las figuras 4-12 y 4-13 representan, el histograma de frecuencias junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull que permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola, el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada altura de ola.

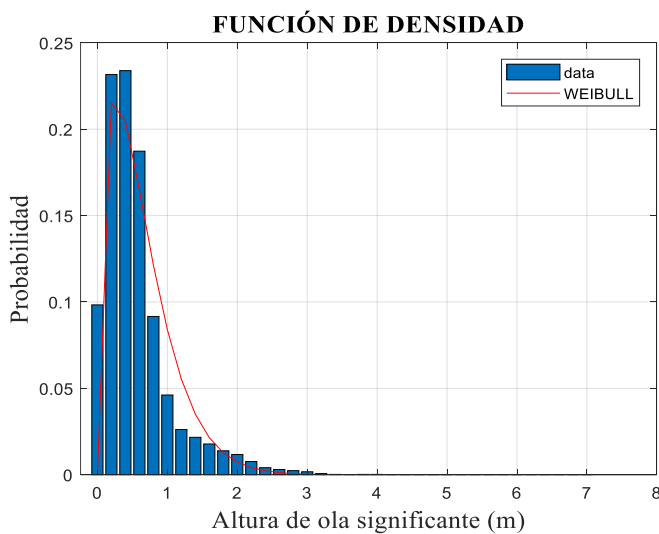


Figura 4-12. Función de densidad

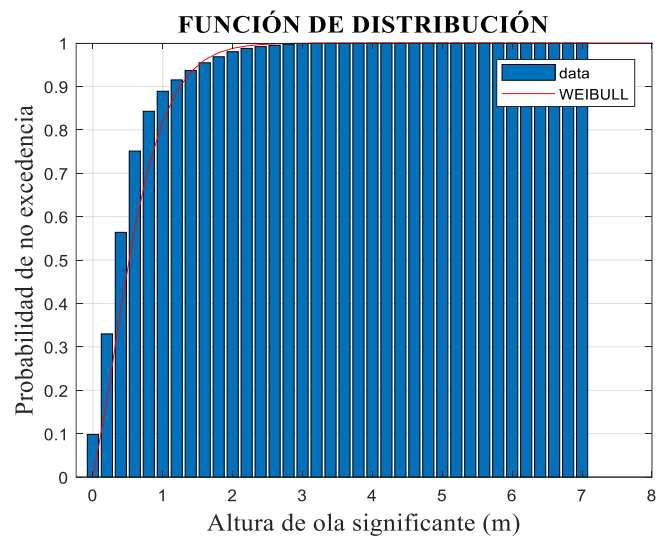


Figura 4-13. Función de distribución

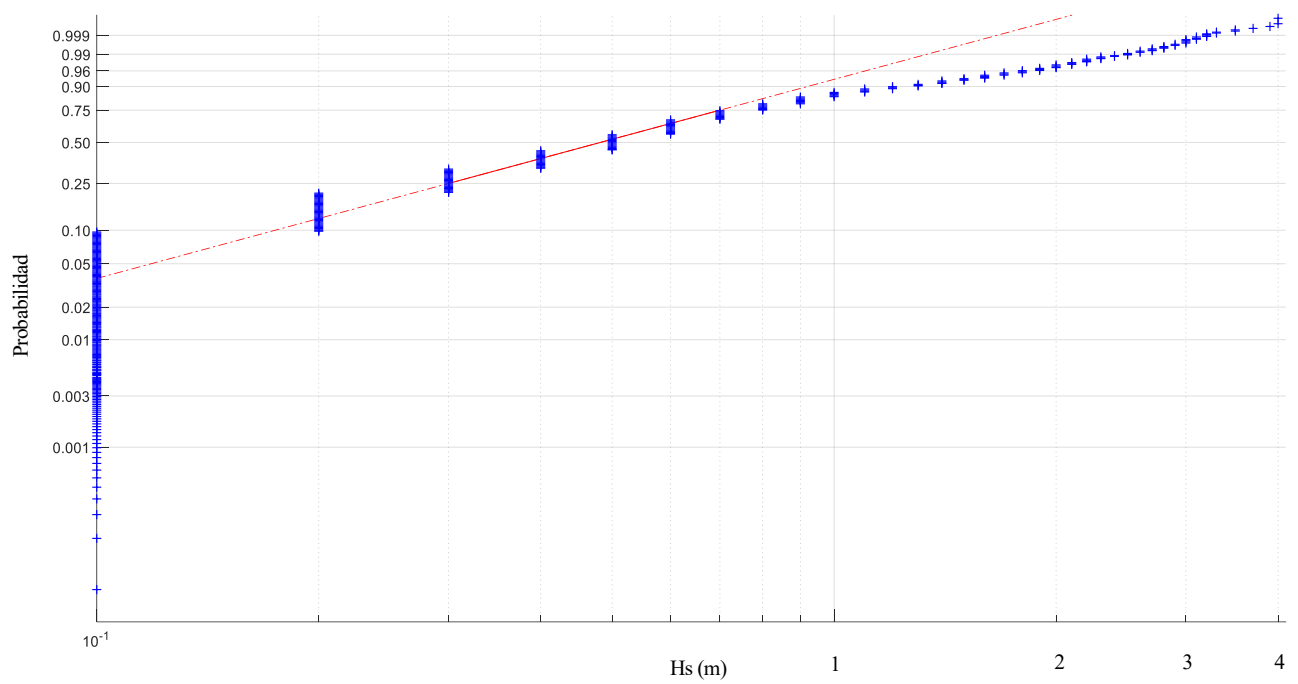


Figura 4-14. Función de distribución en papel probabilístico

4.2.3 Régimen extremal

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold), del que se habló en el apartado 3, fijando el umbral en 3 m, valor que es superado en menos del 1%. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales es de 5 días.

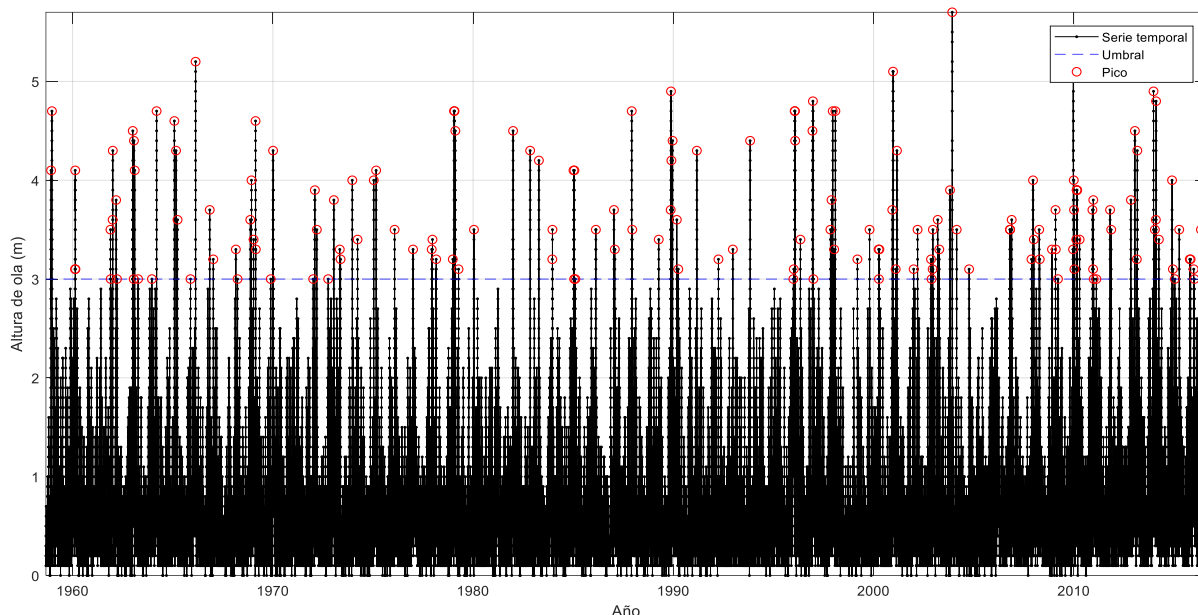


Figura 4-15. Umbral en la serie temporal de máximos mensuales. SIMAR 5026021

En base a esto se han seleccionado los siguientes casos:

- Temporal 1: Del 6 de abril de 2015 a las 00:00 al 13 de abril de 2015 a las 00:00
- Temporal 2: Del 3 de noviembre de 2012 a las 00:00 al 10 de noviembre de 2012 a las 00:00
- Temporal 3: Del 19 de noviembre de 2007 a las 00:00 al 26 de noviembre de 2007 a las 00:00
- Temporal 4: Del 25 de octubre de 2003 a las 00:00 al 1 de noviembre de 2003 a las 00:00
- Semana sin temporales: Del 15 de julio de 2014 a las 00:00 al 22 de julio de 2014 a las 00:00

La figura 4-15 ilustra cómo se realiza la selección de los valores de altura que representan el comportamiento extremal de las series, mientras que en las figuras 4-16 y 4-17 se ve la serie temporal de cada temporal y de la semana sin temporales respecto al umbral definido. Como se puede observar todos los valores pico de la altura significativa de ola en la semana sin temporales se encuentran por debajo del umbral de 3 metros.

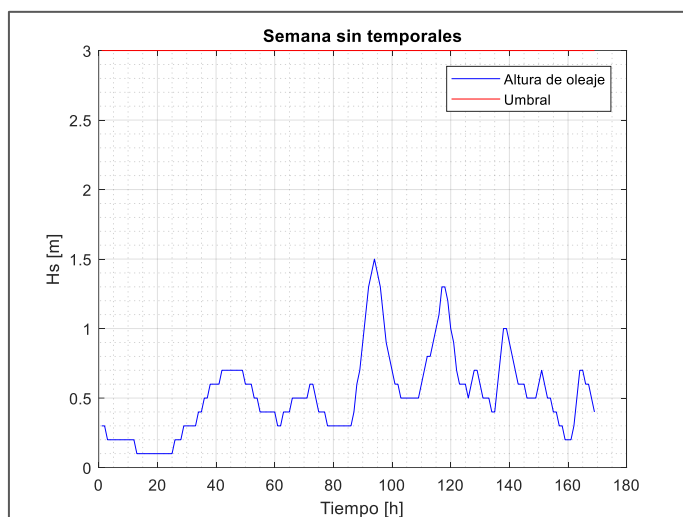


Figura 4-16. Semana sin temporales (POT)

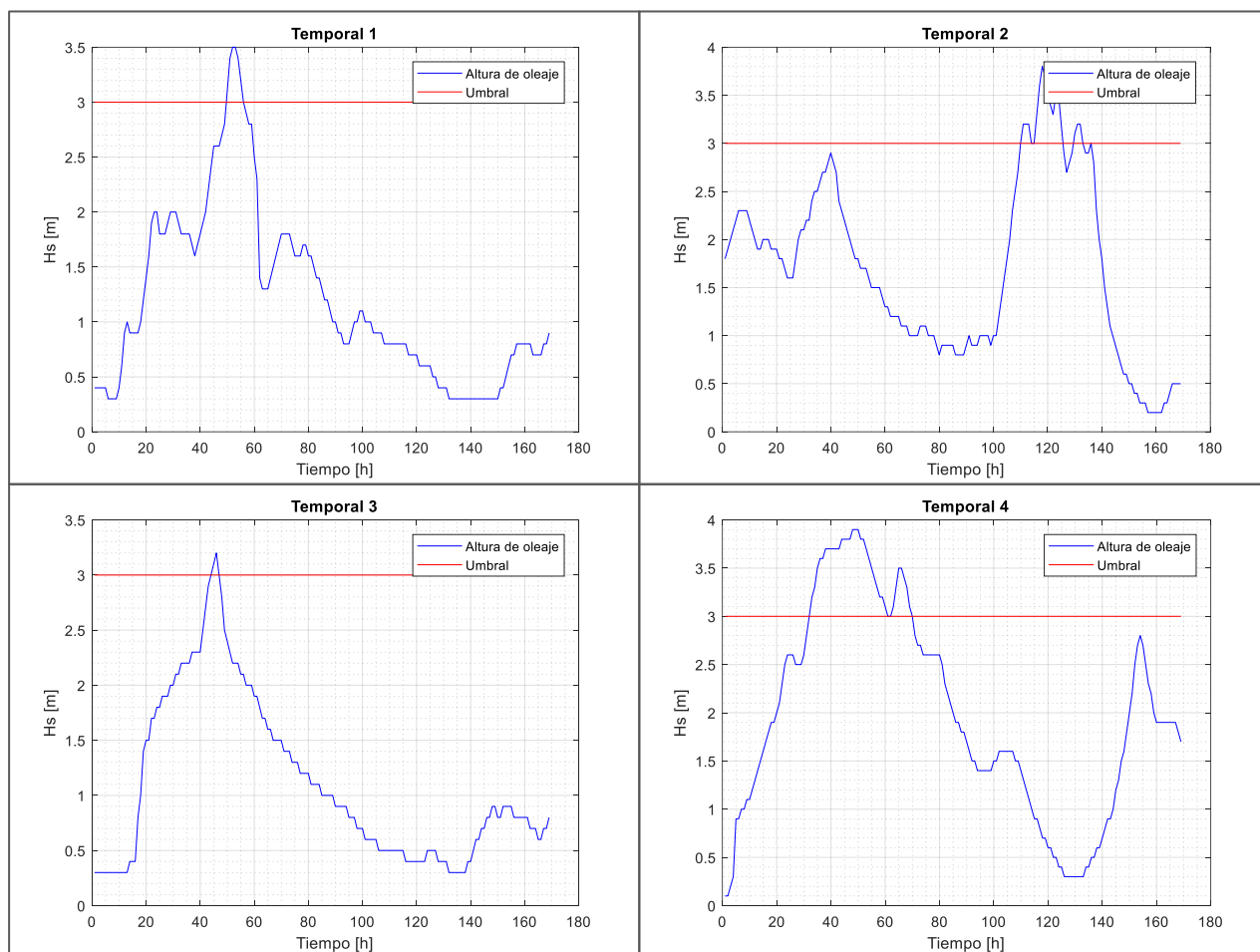


Figura 4-17. Umbral y temporales (POT)

Para caracterizar el régimen extremal se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (5)$$

Esta distribución une las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia. En el caso del régimen extremal de oleaje se sigue una distribución de Gumbel, donde el parámetro de forma K es igual a 0. La función de densidad y la de distribución quedan representadas en la figura 4-18.

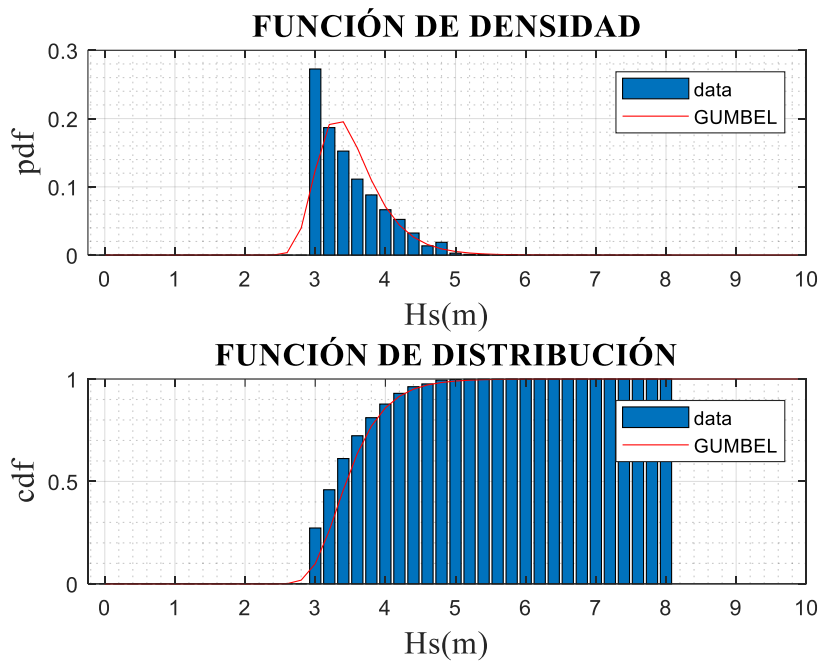


Figura 4-18. Función de densidad y distribución de Gumbel

4.3. Viento

4.3.1 Descripción general del viento en profundidades indefinidas.

En esta descripción se muestra:

- Histogramas de velocidad de viento (v_v) y de dirección media de procedencia del viento (Dir_v).
- Gráfico de dispersión entre las variables v_v y Dir_v .
- Tabla de dispersión representando el diagrama de dispersión de forma numérica.
- Rosa de vientos.

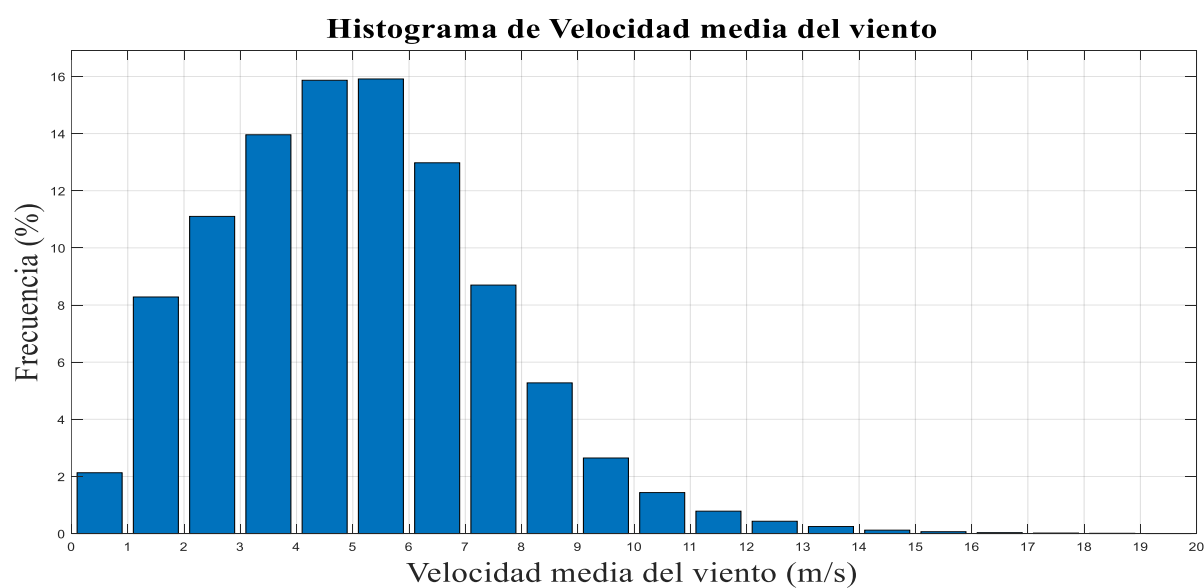


Figura 4-19. Histograma de velocidad media de viento

Tabla 4-8. Frecuencias de velocidad de viento

Vv (m/s)	Frecuencia (%)	Vv (m/s)	Frecuencia (%)
0 – 1	2,129	8 – 9	5,275
1 – 2	8,282	9 – 10	2,646
2 – 3	11,1	10 – 11	1,435
3 – 4	13,96	11 – 12	0,7851
4 – 5	15,87	12 – 13	0,4324
5 – 6	15,91	13 – 14	0,2462
6 – 7	12,98	14 – 15	0,1208
7 – 8	8,699	15 – 16	0,06523

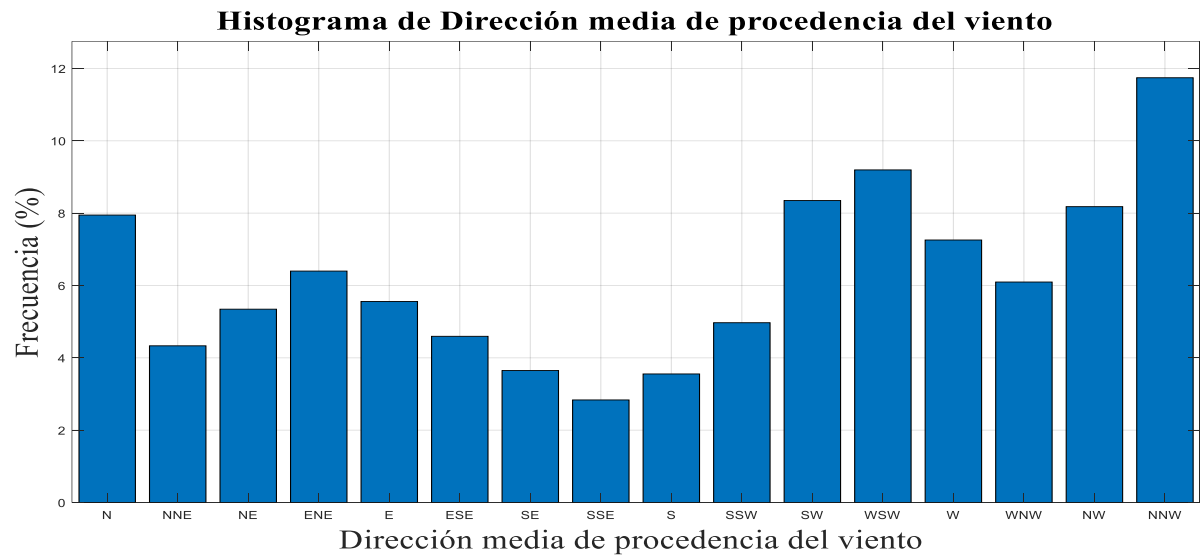


Figura 4-20. Histograma de dirección media de procedencia del viento

Tabla 4-9. Frecuencias de dirección media de procedencia del viento

Dirv (°)	Frecuencia (%)	Dirv (°)	Frecuencia (%)
N	7,947	S	3,554
NNE	4,332	SSW	4,971
NE	5,345	SW	8,348
ENE	6,398	WSW	9,195
E	5,558	W	7,257
ESE	4,595	WNW	6,096
SE	3,648	NW	8,179
SSE	2,836	NNW	11,74

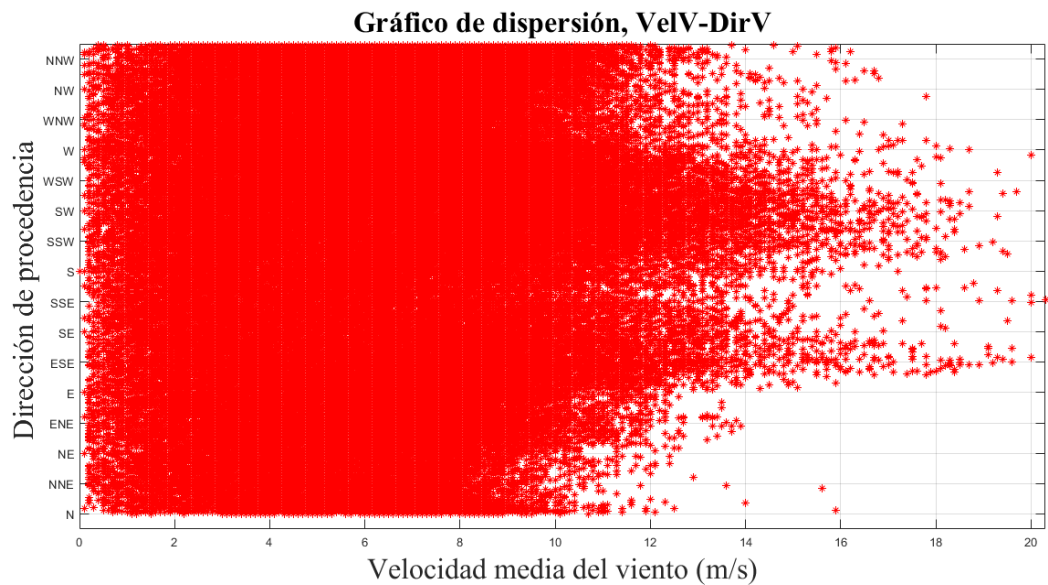


Figura 4-21. Gráfico de dispersión Vv - Dirv

Tabla 4-10. Tabla de dispersión Vv - Dirv

Velocidad de viento - Dirección media de procedencia del viento																		
Vv (m/s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	TOTAL	
	Dirección media de procedencia (°)																	
0	0.12	0.16	0.12	0.12	0.15	0.12	0.15	0.13	0.15	0.12	0.14	0.14	0.12	0.13	0.14	0.11	0.13	2.13
1	0.52	0.51	0.57	0.6	0.64	0.64	0.54	0.5	0.44	0.49	0.45	0.5	0.5	0.5	0.48	0.54	0.49	8.27
2	0.73	0.65	0.69	0.74	0.73	0.73	0.59	0.54	0.5	0.6	0.64	0.81	0.79	0.84	0.75	0.74	0.74	11.08
3	0.93	0.69	0.83	0.9	0.84	0.84	0.6	0.52	0.47	0.66	0.8	1.11	1.23	1.15	1.01	1.12	1.12	13.98
4	1.24	0.74	0.86	1.03	0.83	0.83	0.58	0.46	0.39	0.52	0.79	1.34	1.5	1.27	1.09	1.46	1.76	15.86
5	1.53	0.7	0.9	1.12	0.81	0.81	0.55	0.39	0.28	0.37	0.64	1.31	1.52	1.12	0.93	1.47	2.29	15.93
6	1.34	0.51	0.77	0.94	0.65	0.47	0.47	0.32	0.18	0.23	0.44	1.06	1.19	0.84	0.7	1.14	2.19	12.97
7	0.86	0.25	0.36	0.5	0.42	0.37	0.37	0.26	0.14	0.16	0.28	0.71	0.88	0.58	0.49	0.81	1.63	8.7
8	0.42	0.07	0.16	0.24	0.27	0.28	0.28	0.2	0.1	0.13	0.23	0.5	0.63	0.38	0.28	0.49	0.89	5.27
9	0.17	0.02	0.05	0.09	0.14	0.19	0.19	0.13	0.07	0.1	0.19	0.31	0.36	0.2	0.12	0.17	0.34	2.65
10	0.06	0.01	0.02	0.05	0.06	0.06	0.11	0.08	0.05	0.07	0.12	0.21	0.22	0.13	0.06	0.07	0.12	1.44
11	0.02	0	0.01	0.02	0.04	0.04	0.07	0.05	0.03	0.04	0.09	0.15	0.11	0.06	0.03	0.03	0.03	0.78
12	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.06	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.43
13	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.25
14	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0	0	0	0.11
15	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0	0.05
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0.02
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	7.95	4.31	5.34	6.39	5.56	4.58	4.58	3.64	2.83	3.55	4.95	8.37	9.19	7.25	6.1	8.17	11.75	

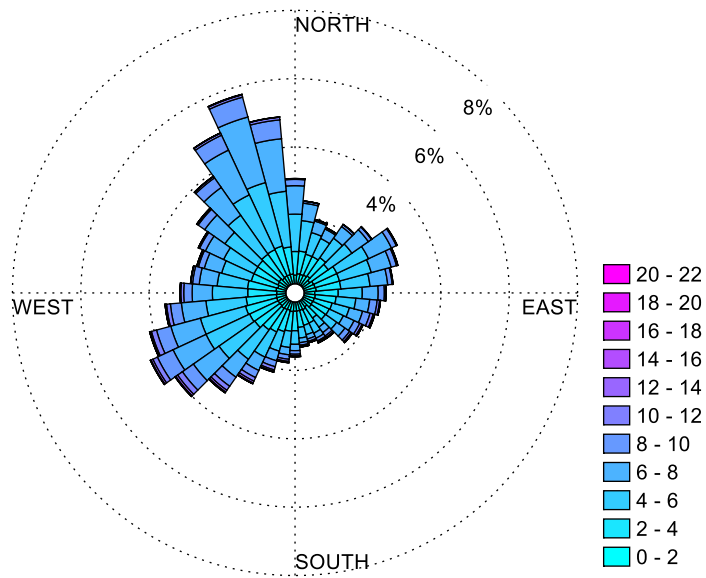


Figura 4-22. Rosa de viento SIMAR 5026021

4.3.1.1 Resumen de resultados

De esta descripción se pueden remarcar los siguientes resultados:

- Rango de velocidades: 0 – 16 m/s
- Velocidades más frecuentes: 4 – 6 m/s
- Direcciones medias de procedencia más frecuentes entre Norte y Sur

5 MODELO NUMÉRICO

5.1. Ecuaciones del módulo WAVE

El modelo de oleaje que utiliza el módulo WAVE de Delft3D es el modelo SWAN.

SWAN permite la generación del oleaje espectral por efecto de la acción del viento y la propagación del mismo oleaje hacia la costa. En este modelo el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de la acción de onda $N(\sigma, \theta)$ en vez de con el espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$, siendo $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$. El espectro puede variar en el tiempo y en el espacio. La evolución del espectro del oleaje es descrita mediante la ecuación de balance de la acción espectral que en coordenadas cartesianas es (Hasselmann et al., 1973):

$$\partial \partial_t(N) + \partial \partial_x(c_x N) + \partial \partial_y(c_y N) + \partial \partial_\sigma(c_\sigma N) + \partial \partial_\theta(c_\theta N) = S_\sigma \quad (6)$$

donde, el primer término de la parte izquierda representa la variación local en el tiempo de la densidad de la acción, el segundo y tercer términos representan la variación de $N(\sigma, \theta)$ en las coordenadas geográficas (con velocidades de propagación c_x y c_y), el cuarto término representa la variación debida a desplazamiento de frecuencias por profundidad y corrientes (siendo c_σ la velocidad de propagación en el espacio σ) y el quinto término representa las variaciones debidas a la refracción (por profundidad o por corriente, con velocidad de propagación c_θ en el espacio θ). El término de la derecha representa la contribución de energía dada por la generación de oleaje, la disipación del mismo y las interacciones ola-ola. Este término es representado por la superposición de estos términos fuentes de energía. Los procesos que el modelo SWAN considera son: generación por viento, disipación de oleaje por whitecapping, fricción con el fondo, rotura inducida por variaciones de profundidad, interacciones no lineales entre ola-ola (quadruplets y triads). Además, computa la propagación del oleaje detrás de obstáculos y el set-up debido al oleaje. Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal del oleaje de Whitham (1974).

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (7)$$

donde,

- S_{in} es la transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- S_{nl} son las interacciones no lineales entre olas. Considera dos casos, interacciones tríadicas e interacciones entre cuádrupletes (quadruplets y triads).
- $S_{ds,w}$ es la disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping.
- $S_{ds,br}$ es el término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ es la disipación de energía por fricción con el fondo.

Véase el “Apéndice B: Ecuaciones del módulo WAVE” para más información.

5.2. Datos de entrada

5.2.1 Línea de costa

La línea de costa se extrae de los datos del terreno mediante Matlab. Una vez se han cargado las coordenadas xyz del terreno, se buscan los puntos cuya z sea igual a cero y se obtienen sus coordenadas x e y . Estos puntos serán los que formen la línea de costa (Figura 5-1), la cual se exportará para importarla posteriormente en Delft3D.

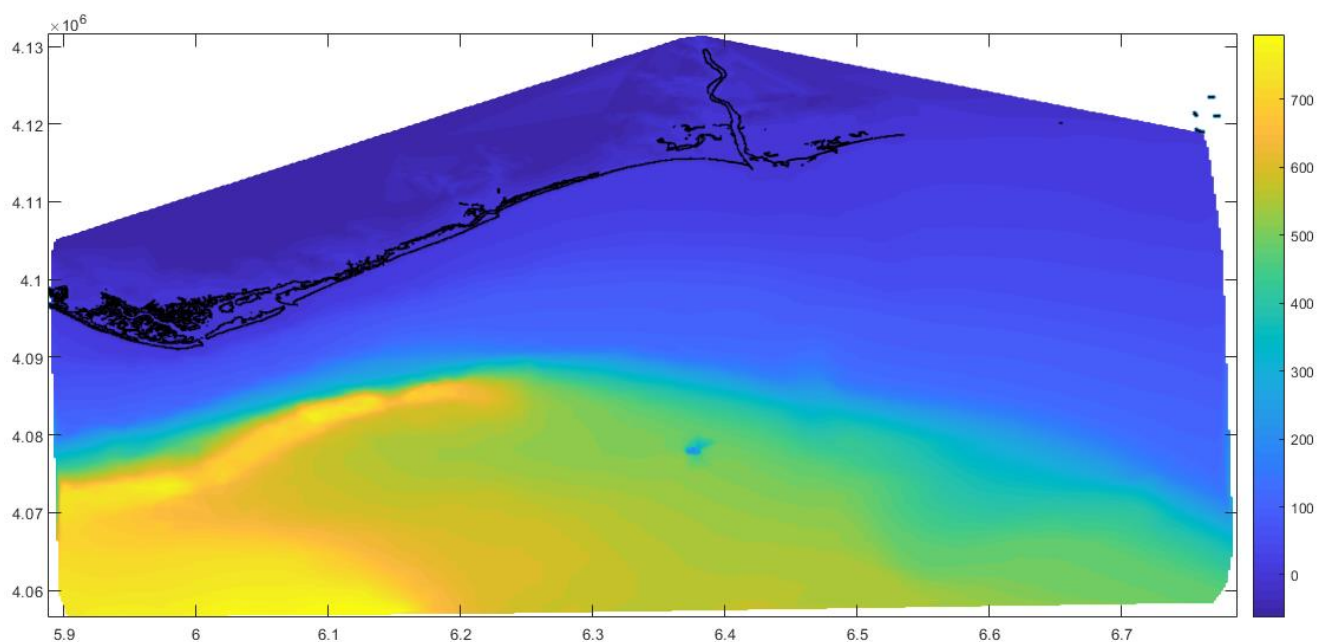


Figura 5-1. Terreno y línea de costa.

5.2.2 Malla

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. En primer lugar, es necesario preparar los datos de terreno en Matlab (Figura 5-2) para importarlo a Delft3d. Los datos batimétricos deben ser valores positivos y los topográficos negativos.

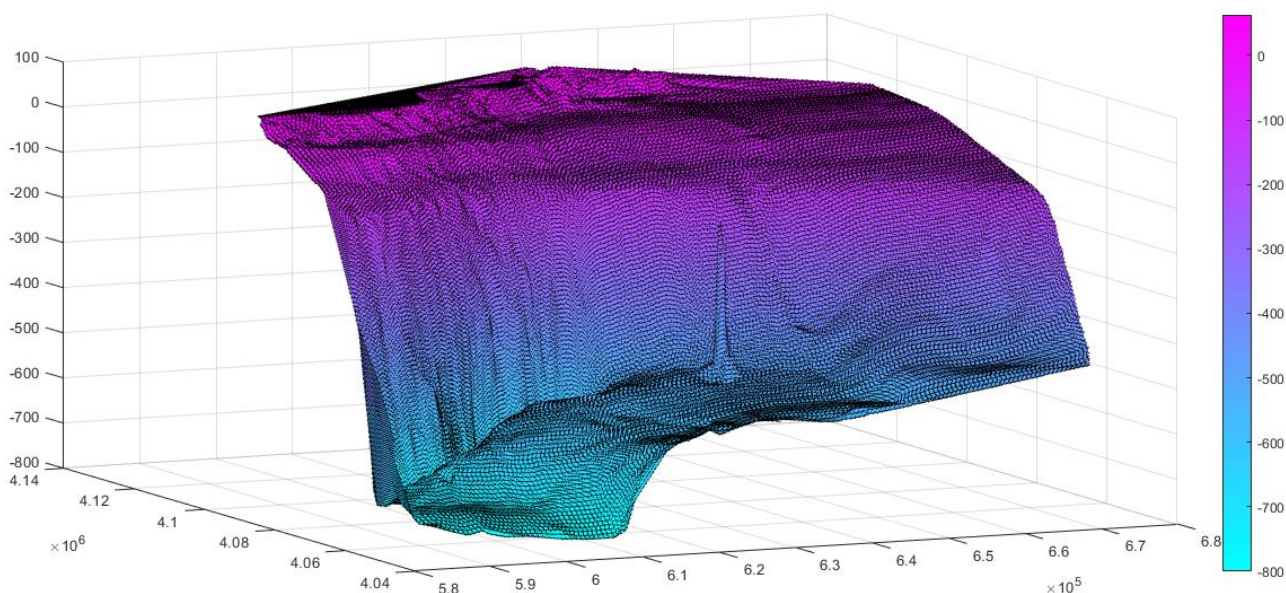


Figura 5-2. Superficie 3D del terreno

Una vez cargado el terreno en Delft3D, los criterios que se han empleado para el diseño de la malla son los siguientes:

- Creación de tres líneas rectas y una curva en la zona correspondiente al mar que encierran la zona de estudio.
- Asegurar un buen anidamiento de la malla, evitando que se inunden zonas de tierra seca.

- Evitar zonas que puedan impedir una buena propagación del oleaje, como zonas sin datos.
- Orientar la malla correctamente para que abarque el oleaje predominante.

Siguiendo estos criterios se ha creado una malla compuesta por 4 contornos, tres de los cuales se encuentran en tierra y el cuarto que abarca el oleaje procedente de las direcciones, Suroeste, Sur y Sureste, comprendidas entre los 180° y los 360° ($N = 90^\circ$). La profundidad máxima que se alcanza con esta malla es de unos 120 metros aproximadamente en la zona más alejada de la costa. La resolución de la malla es de 244×244 celdas.

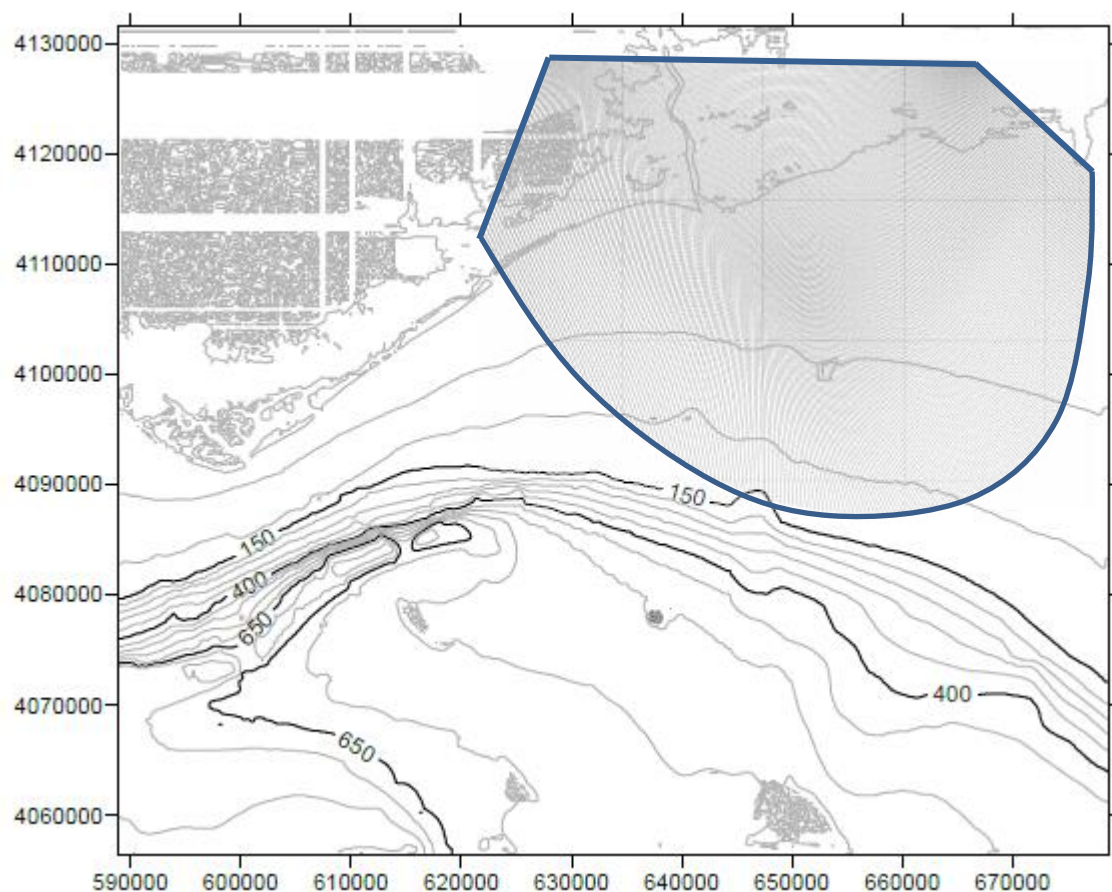


Figura 5-3. Malla en azul sobre el terreno. Batimetría en metros

5.2.3 Batimetría

La batimetría se ha importado en Delft3D en formato xyz para signarle a cada punto de la malla su profundidad correspondiente (Figura 5-4).

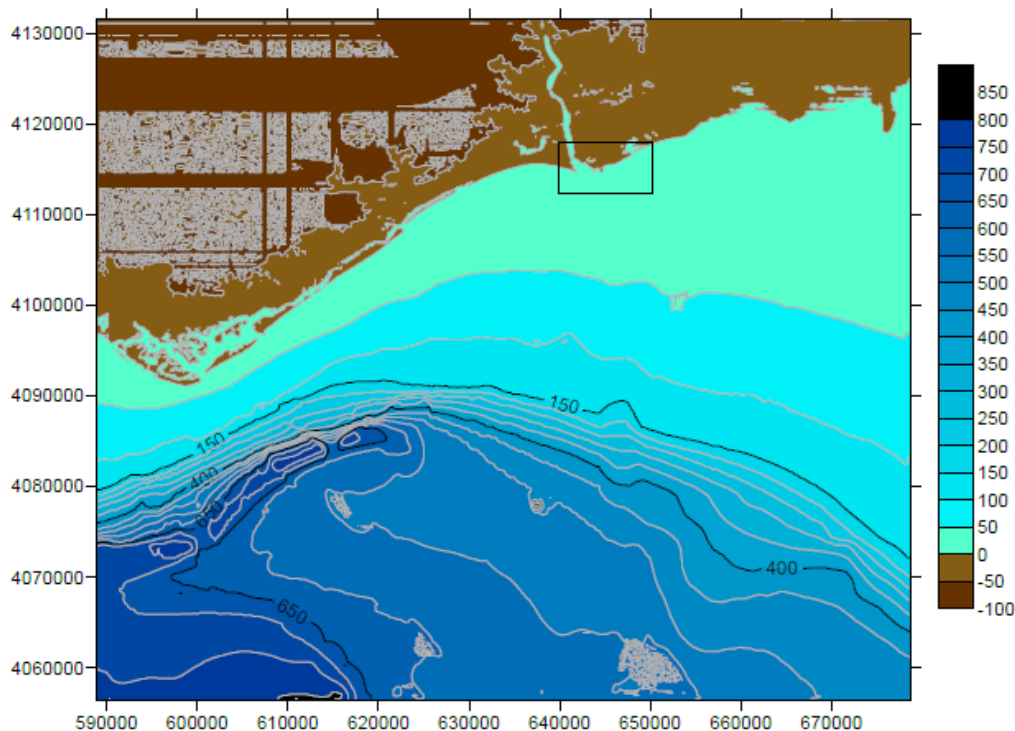


Figura 5-4. Batimetría en metros y zona de estudio en recuadro.

5.2.4 Condiciones de contorno

El archivo “wavecon” es el archivo que contiene los datos a propagar. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas:

- 1- Tiempo en minutos con un salto de una hora.
- 2- Altura significativa de ola (H_s) en metros.
- 3- Periodo pico (T_p) en segundos.
- 4- Dirección de procedencia del oleaje (θ) en grados.
- 5- Dispersión (ms).
- 6- Nivel de la superficie libre (wl, water level) en metros obtenido del archivo de la REDMAR.
- 7- Velocidad del viento (v_v) en m/s.
- 8- Dirección de procedencia del viento (θ_v) en grados.

En este archivo además tiene en cuenta la condición de contorno (boundary) del modelo, por lo que el nombre de esta condición de contorno deberá ser el mismo que el de la condición de contorno del modelo y además su extensión debe ser el nombre que se le haya asignado al modelo, por ejemplo, “wavecon.Modelo1”.

5.2.5 Parámetros del modelo

Es necesario definir un valor para cada uno de los parámetros internos del módulo WAVE. Para más información véase “Apéndice C: Parámetros WAVE”. Los valores definidos tras la calibración pueden verse en el apartado 5.4.

5.3. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se han utilizado los datos de un punto cercano a la costa, en este caso, del punto SIMAR 5026023. Para cada caso se ha realizado la correspondiente simulación y comparado posteriormente (con los coeficientes de correlación mencionados en el apartado 3.3.1) los datos obtenidos de la misma con los datos medidos por el punto SIMAR.

Como ya se dijo el parámetro que se ha utilizado para la calibración es el coeficiente de Collins, el cual se ha ido modificando hasta obtener unos coeficientes de correlación favorables. En las figuras 5-5, 5-6 y 5-7 se puede ver la variación de las variables H_s , T_p y Dir según los distintos coeficientes de Collins que se han probado para el caso 0 (semana sin temporales).

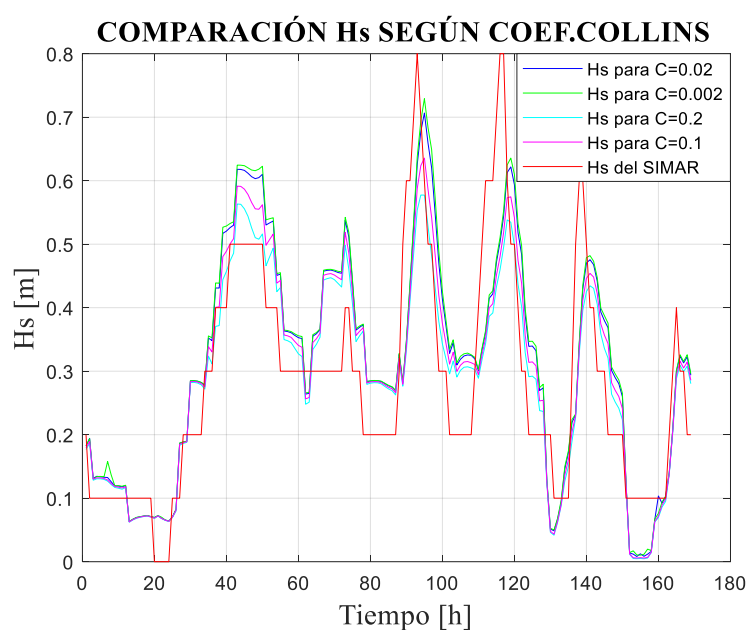


Figura 5-5. Comparación de H_s según coeficiente de Collins

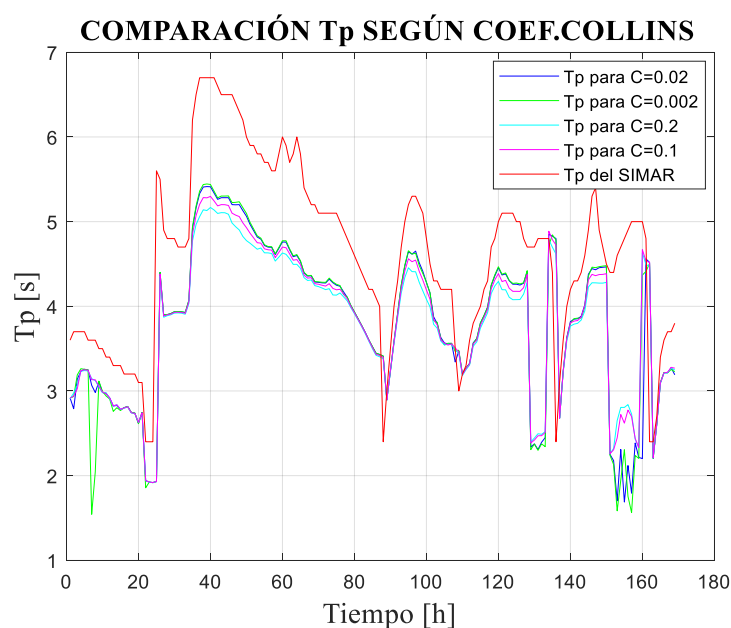


Figura 5-6. Comparación de T_p según coeficiente de Collins

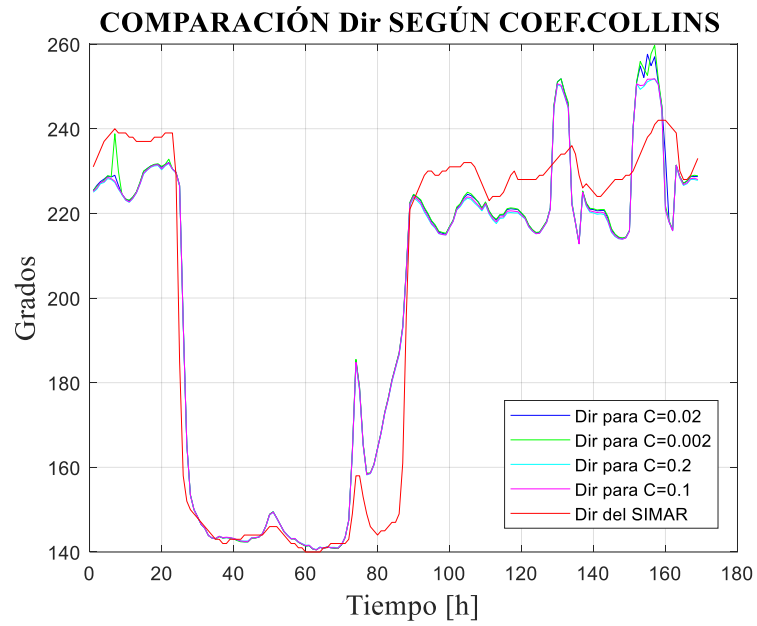


Figura 5-7. Comparación de Dir según coeficiente de Collins

En las tablas 5-1, 5-2 y 5-3 se recogen, según los coeficientes de Collins utilizados, los coeficientes de correlación R y Skill, así como RMSE, para las mismas variables, H_s , T_p y Dir.

Tabla 5-1. Tabla comparadora de ajuste para H_s

Collins	RMSE	R	Skill
0.02	0.1085	0.8209	0.8133
0.002	0.1111	0.8201	0.8089
0.2	0.0995	0.8217	0.8189
0.1	0.1021	0.8223	0.8214

Tabla 5-2. Tabla comparadora de ajuste para T_p

Collins	RMSE	R	Skill
0.02	1.1175	0.6910	0.5183
0.002	1.1216	0.5963	0.5255
0.2	1.0875	0.7372	0.5152
0.1	1.0611	0.7357	0.5365

Tabla 5-3. Tabla comparadora de ajuste para Dir

Collins	RMSE	R	Skill
0.02	12.2154	0.9526	0.9531
0.002	12.2599	0.9520	0.9529
0.2	12.1831	0.9539	0.9528
0.1	12.1854	0.9536	0.9529

Tras hacer las comprobaciones anteriores se llega a la conclusión de que el valor que mejor se ajusta es el de 0.1, quedando así calibrado y validado el modelo.

5.4. Parámetros tras la calibración

Estos valores se han obtenido de estudios previos realizados en la zona atlántica tales como “Hydrodynamics response to planned human interventions in a highly altered embayment: The example of the Bay of Cádiz (Spain)” (Zarzuelo, C., 2015).

RESOLUCIÓN ESPECTRAL

- **Número de direcciones:** 72
- **Frecuencia más baja:** 0,03 Hz
- **Frecuencia más alta:** 1 Hz
- **Número de contenedores de frecuencia:** 37

PARÁMETROS FÍSICOS

- **Rotura inducida por el fondo:**
 - $\alpha = 1$
 - $\gamma = 1,2$
- **Interacciones triádicas no lineales:**
 - $\alpha = 0,1$
 - $\beta = 9$
- **Fricción del fondo:**
 - Modelo: Collins
 - Coeficiente de fricción: 0,1
- **Difracción:**
 - Coeficiente de suavizado: 0,9
 - Pasos de suavizado: 900

- **Descrestamiento:** Van der Westhuysen

PARÁMETROS NUMÉRICOS

- **Porcentaje de puntos húmedos de la malla:** 98%
- **Número máximo de iteraciones:** 15

6 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

6.1. Análisis del régimen medio

Se ha analizado el régimen medio en 5 puntos de control seleccionados cerca de la costa (Figura 6-1) para cada uno de los escenarios. Se compara así el escenario sin temporales, escenario 0, con los distintos forzamientos seleccionados.



Figura 6-1. Puntos de control

6.1.1 Escenario 0

Como se ha dicho en varias ocasiones este es el escenario en el que no se produce ningún temporal.

- Del 15 de julio de 2014 a las 00:00 al 22 de julio de 2014 a las 00:00

En esta serie temporal (Figura 6-2) de una semana de duración las alturas significantes de ola se encuentran comprendidas entre 0,1 y 1,5 metros.

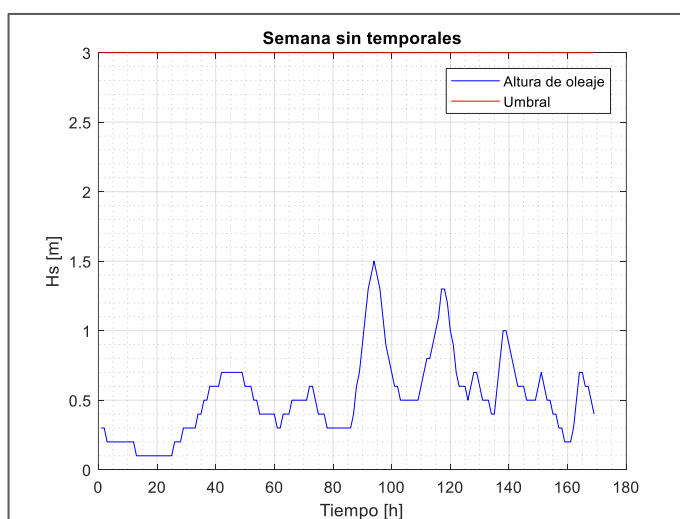
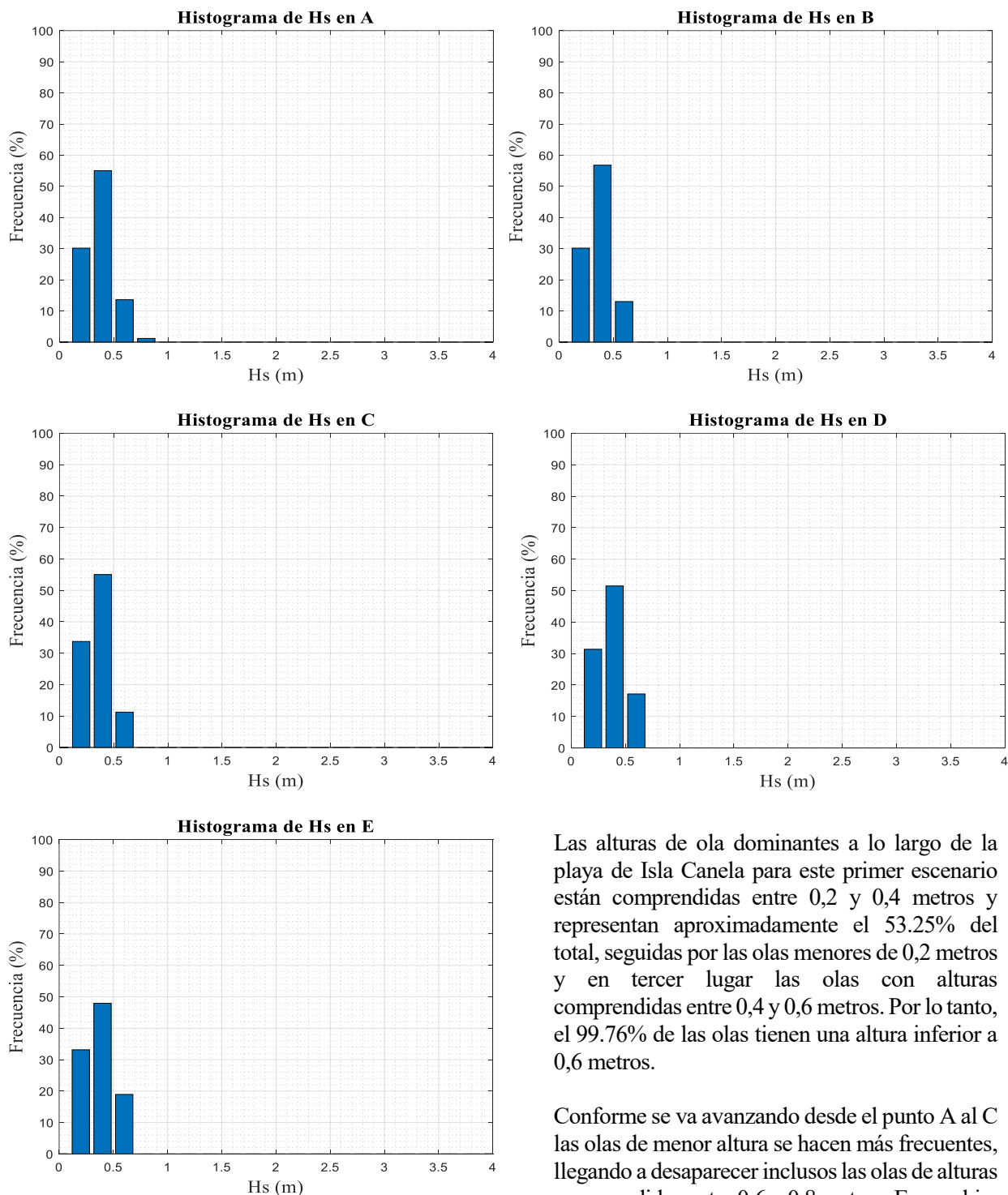


Figura 6-2. Serie temporal de altura significativa (Escenario 0)

6.1.1.1 Histogramas

Figura 6-3. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 0)



Las alturas de ola dominantes a lo largo de la playa de Isla Canela para este primer escenario están comprendidas entre 0,2 y 0,4 metros y representan aproximadamente el 53.25% del total, seguidas por las olas menores de 0,2 metros y en tercer lugar las olas con alturas comprendidas entre 0,4 y 0,6 metros. Por lo tanto, el 99.76% de las olas tienen una altura inferior a 0,6 metros.

Conforme se va avanzando desde el punto A al C las olas de menor altura se hacen más frecuentes, llegando a desaparecer incluso las olas de alturas comprendidas entre 0,6 y 0,8 metros. En cambio,

del punto C al E se observa un aumento de la frecuencia de las olas comprendidas entre 0,4 y 0,6 metros. (Tabla 6-1). La tendencia descrita puede observarse con mayor detalle en la figura 6-4.

Tabla 6-1. Tabla de frecuencias altimétricas (Escenario 0)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Frecuencia (%)					
0 - 0.2	30.18	30.18	33.73	31.36	33.14	31.718
0.2 - 0.4	55.03	56.8	55.03	51.48	47.93	53.254
0.4 - 0.6	13.61	13.02	11.24	17.16	18.93	14.792
0.6 - 0.8	1.180	0	0	0	0	0.236
0.8 - 1	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

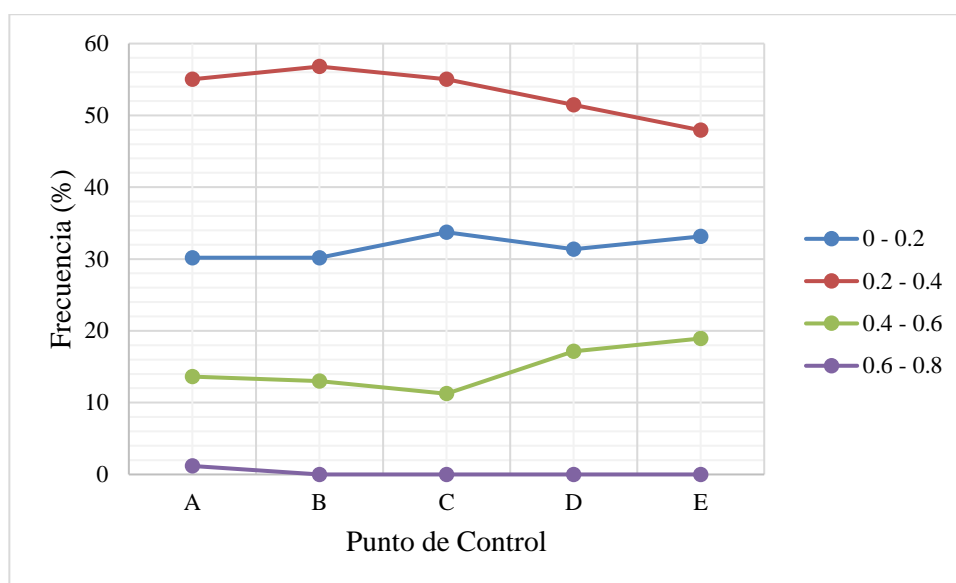
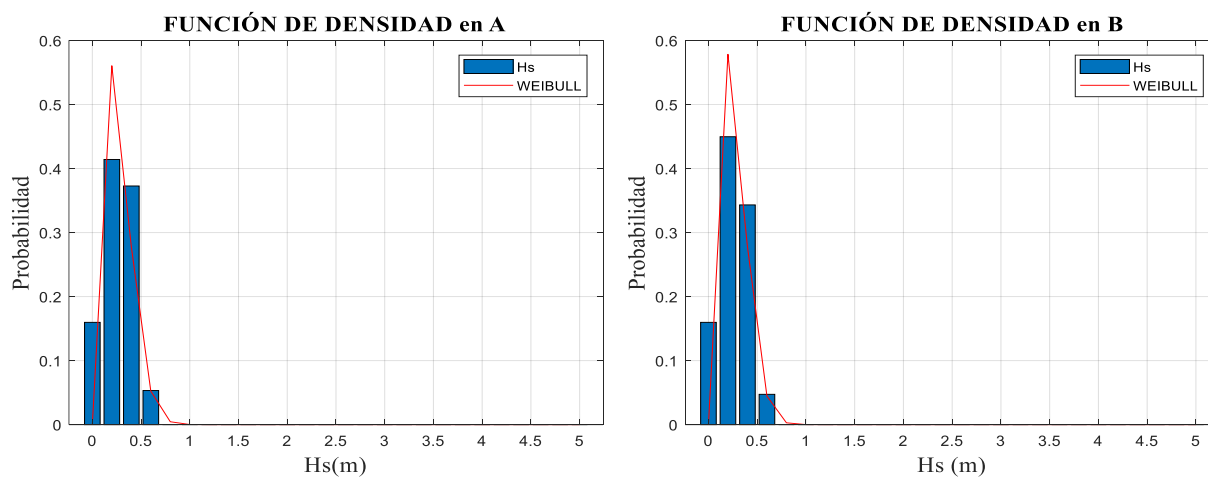
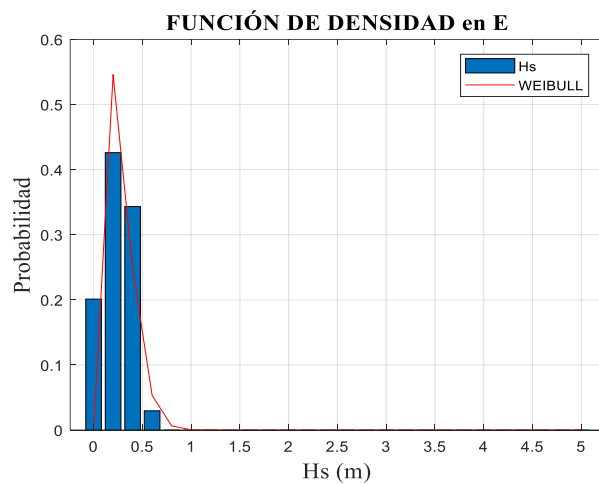
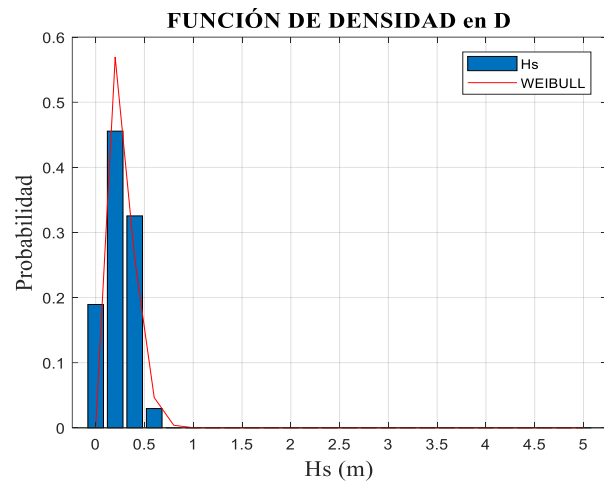
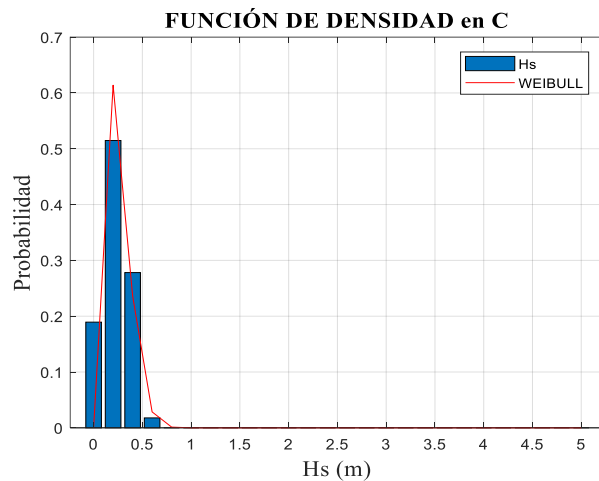


Figura 6-4. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 0)

6.1.1.2 Funciones de densidad de Weibull

Figura 6-5. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 0)





Las cinco funciones son muy parecidas, pero como se refleja en la figura 6-6, se observa un fenómeno parecido que el observado en los histogramas. Es decir, en C las olas de menor altura (0,2 – 0,4 m) se hacen más probables.

De media hay un 96% de probabilidades de que las olas sean menores de 0,6 metros y un 63% de que sean menores de 0,4 metros (Tabla 6-2).

Tabla 6-2. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 0)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Densidad de probabilidad					
0 - 0.2	0.1598	0.1598	0.1893	0.1893	0.2012	0.17988
0.2 - 0.4	0.4142	0.4497	0.5148	0.4556	0.426	0.45206
0.4 - 0.6	0.3728	0.3432	0.2781	0.3254	0.3432	0.33254
0.6 - 0.8	0.05232	0.04734	0.01775	0.02959	0.02959	0.03532
0.8 - 1	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

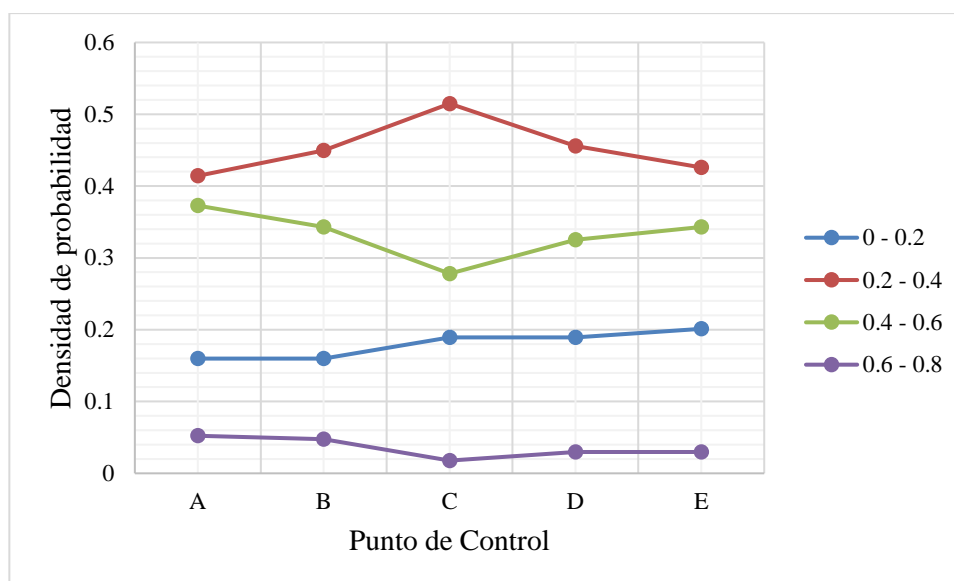
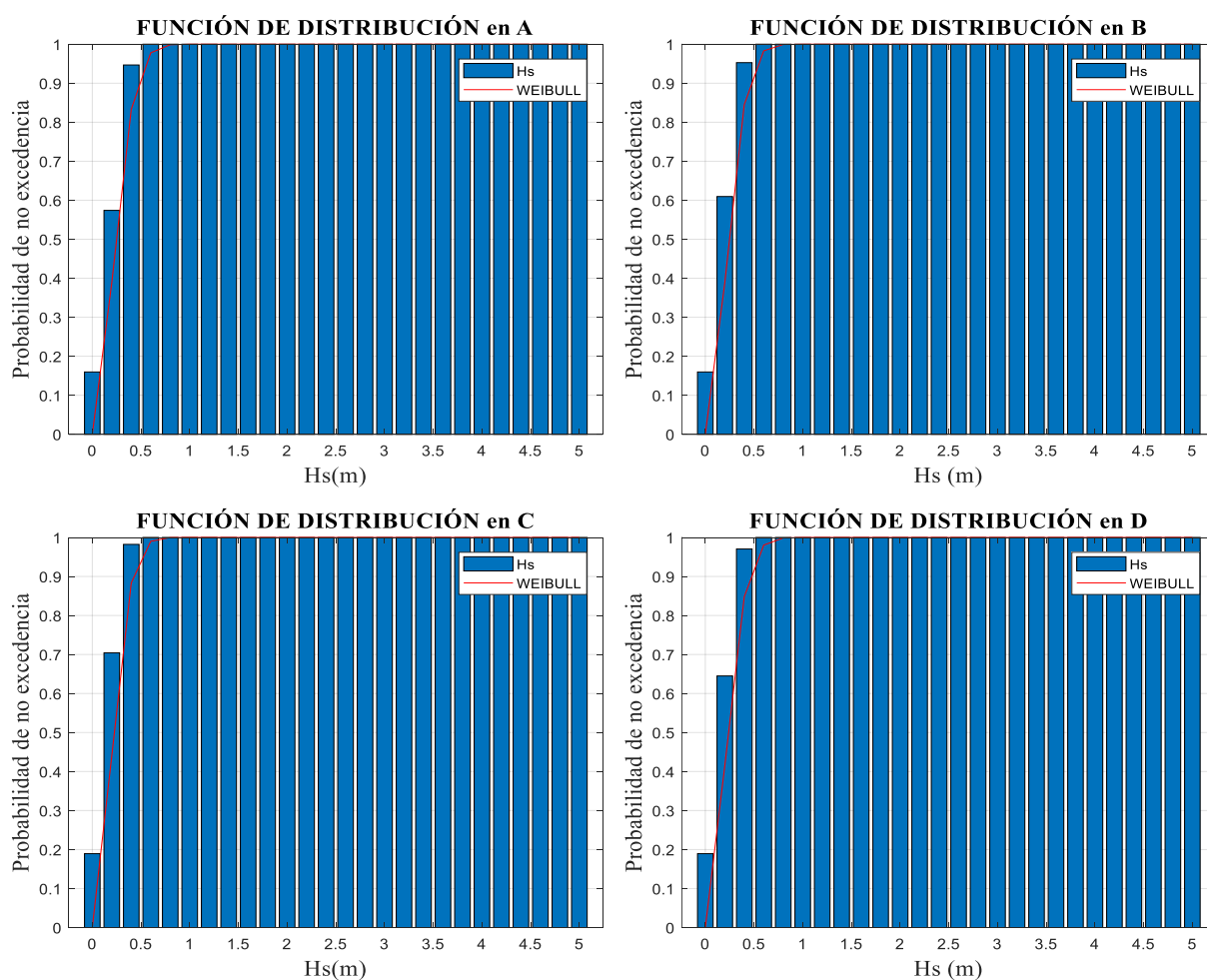
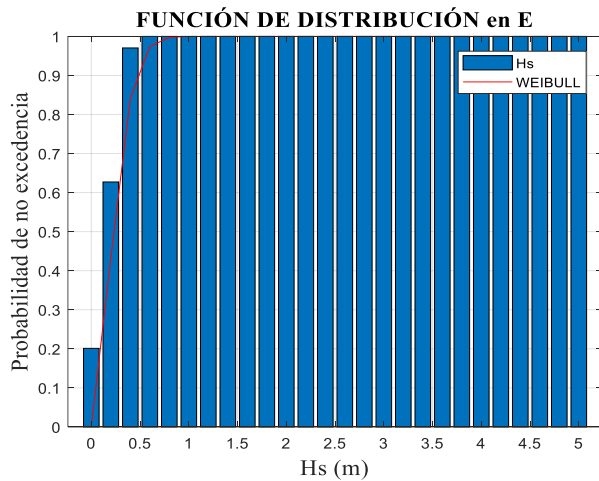


Figura 6-6. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 0)

6.1.1.3 Funciones de distribución de Weibull

Figura 6-7. Funciones de distribución (Escenario 0)





De nuevo los diagramas de estas funciones de distribución de Weibull son muy parecidas entre sí.

Como se dijo antes hay un 96% de probabilidades de que no se exceda la altura de 0,6 metros. Esto puede observarse claramente en la tabla 6-3.

Tabla 6-3. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 0)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Probabilidad de no excedencia					
0.2	0.1598	0.1598	0.1893	0.1893	0.2012	0.17988
0.4	0.574	0.6095	0.7041	0.645	0.6272	0.63196
0.6	0.9467	0.9527	0.9822	0.9704	0.9704	0.96448
0.8	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

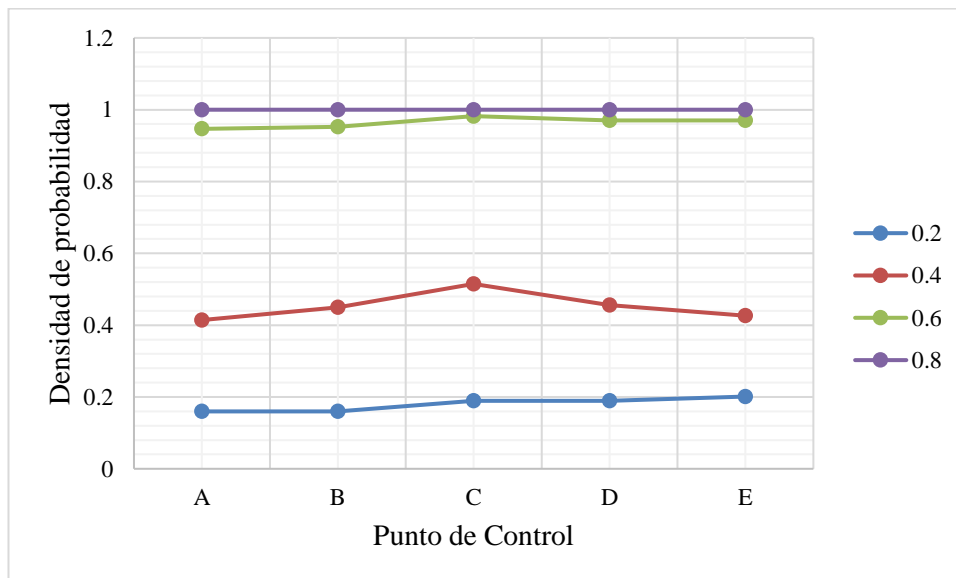


Figura 6-8. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 0)

6.1.1.4 Resultante Media Anual

En este apartado se ha calculado la Resultante Media Anual (RMA) del oleaje a lo largo de la costa de Isla Canela. La RMA es un vector que representa el flujo medio de energía del oleaje. El módulo de este vector indica en que zonas se produce más o menos aporte de energía. Comparando el mismo punto de control en distintos escenarios se puede comprobar que escenario produce un mayor aporte de energía en dicho punto. El punto cuyo vector tenga mayor modulo será el punto donde haya mayor aporte de energía.

Es importante también la variación de la dirección entre escenarios, ya que un fuerte cambio en la dirección significa que la costa tratara de ponerse perpendicular a dicha dirección, en un intento por buscar de nuevo el equilibrio.

Para realizar este cálculo se ha programado una rutina en Matlab. Una vez exportados las componentes X e Y de H_s tras la simulación, estos, se han cargado en Matlab y se han interpolado para obtener estos mismos datos en los puntos de control seleccionados (Figura 6-1). Seguidamente se ha utilizado la formulación:

$$(R_x, R_y) = \frac{1}{8} \rho g (H_x, H_y)^2 \frac{cg}{2} \quad (8)$$

donde,

- ρ : densidad del agua de mar: 1025 kg/m³
- g : gravedad: 9,81 m/s²
- H_x, H_y : componentes x e y de la altura significativa de ola
- cg : celeridad de grupo:

$$cg = c \cdot n \quad (9)$$

$$c = \frac{L}{T} \quad (10)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (11)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (12)$$

- c : velocidad
- L : longitud de onda
- T : periodo
- h : profundidad
- k : número de onda

El ángulo γ , existente entre R_x y R_y , y tomando el Norte como 90° y el Este como 0° se define como:

$$\gamma = \arctg \left(\frac{R_y}{R_x} \right) \quad (13)$$

Tabla 6-4. RMA (Escenario 0)

P.C	R _x (N/s)	R _y (N/s)	R (N/s)	γ (°)
A	71.1284	120.3161	139.7685	59.4093
B	54.7164	114.6040	126.9960	64.4784
C	49.5058	107.3965	118.2572	65.2520
D	41.2002	102.8587	110.8033	68.1713
E	57.0760	145.9400	156.7040	68.6399



Figura 6-9. Vectores RMA (Escenario 0)

En la figura 6-9 se ve que los vectores apuntan en dirección Noreste, por tanto, el oleaje favorece el transporte de sedimentos en esta dirección. Avanzando del punto A al E el ángulo aumenta, lo que significa que el vector tiende a apuntar hacia el norte. En cuanto al módulo, este presenta sus valores más altos en los extremos, especialmente en el punto A (Tabla 6-4).

Frente a los puntos A, B y C la costa parece ser perpendicular a los vectores de dichos puntos. Esta perpendicularidad sugiere que la línea de costa está alcanzando el equilibrio mientras que frente a los puntos D y E está aún en proceso de alcanzar ese equilibrio (Figura 6-9).

6.1.2 Escenario 1

- Del 6 de abril de 2015 a las 00:00 al 13 de abril de 2015 a las 00:00

En esta serie temporal (Figura 6-10) de una semana de duración las alturas significantes de ola se encuentran comprendidas entre 0,3 y 3,5 metros.

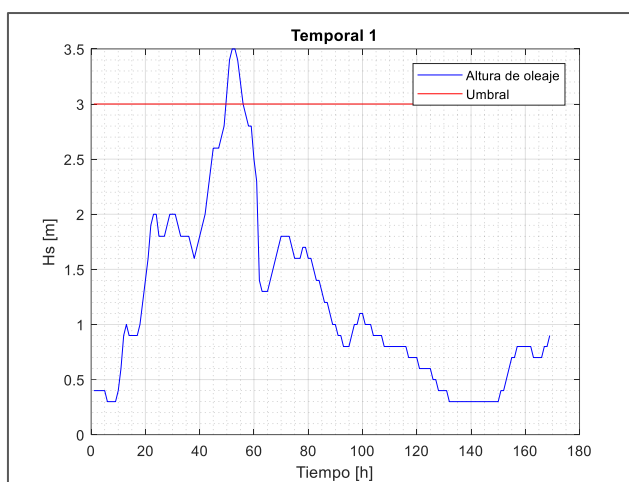
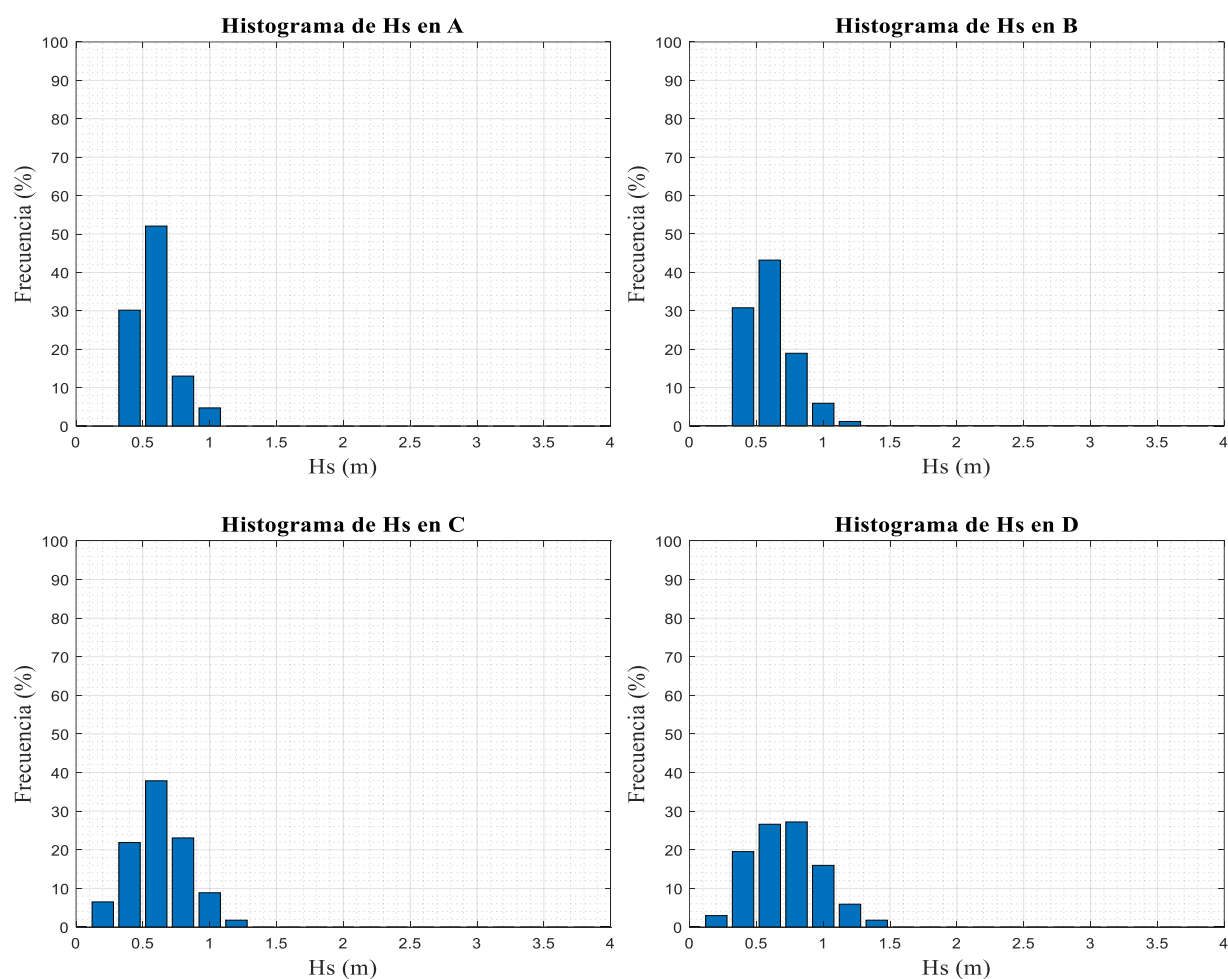
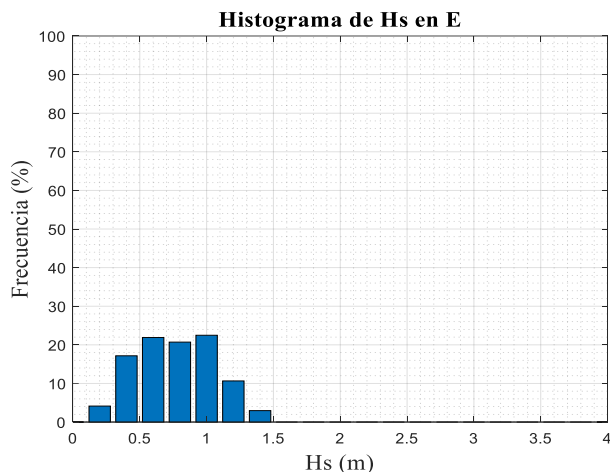


Figura 6-10. Serie temporal de altura significativa (Escenario 1)

6.1.2.1 Histogramas

Figura 6-11. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 1)





Conforme se avanza de A a E la base del histograma se va ensanchando y su pico disminuyendo. Por ello en el punto E, como se observa en el histograma, las frecuencias de los valores comprendidos entre 0,4 y 1 son parecidas.

De media, en este escenario, las alturas más frecuentes son las comprendidas entre 0,4 y 0,6 metros con una frecuencia del 36,33%, seguidas por las olas entre los 0,2 y 0,4 metros, y las olas entre 0,6 y 0,8 metros (Tabla 6-5).

A diferencia del escenario 0, en este caso aparecen olas que llegan a una altura de hasta 1,4 metros, frente a los 0,8 de máxima del

escenario 0. Y las olas menores de 0,2 metros que en el caso 0 representaban el 31,72% son ahora poco frecuentes con un 2,72% de media.

Tabla 6-5. Tabla de frecuencias altimétricas (Escenario 1)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Frecuencia (%)					
0 - 0.2	0	0	6.51	2.96	4.14	2.72
0.2 - 0.4	30.18	30.77	21.89	19.53	17.16	23.91
0.4 - 0.6	52.07	43.2	37.87	26.63	21.89	36.33
0.6 - 0.8	13.02	18.93	23.08	27.22	20.71	20.59
0.8 - 1	4.730	5.92	8.88	15.98	22.49	11.6
1 - 1.2	0	1.18	1.77	5.92	10.65	3.90
1.2 - 1.4	0	0	0	1.77	2.96	0.95
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

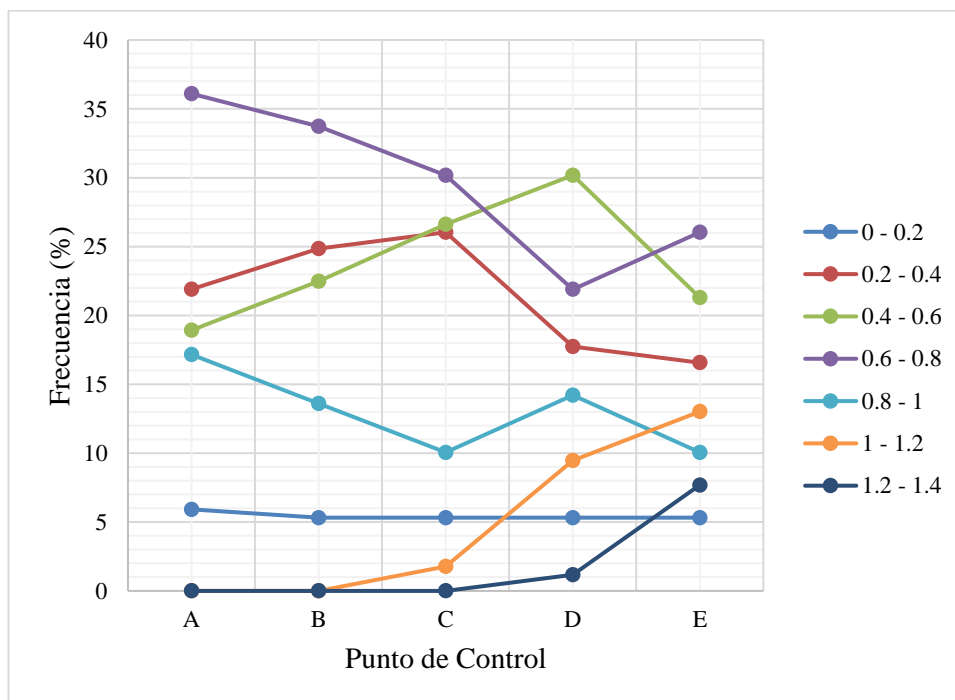
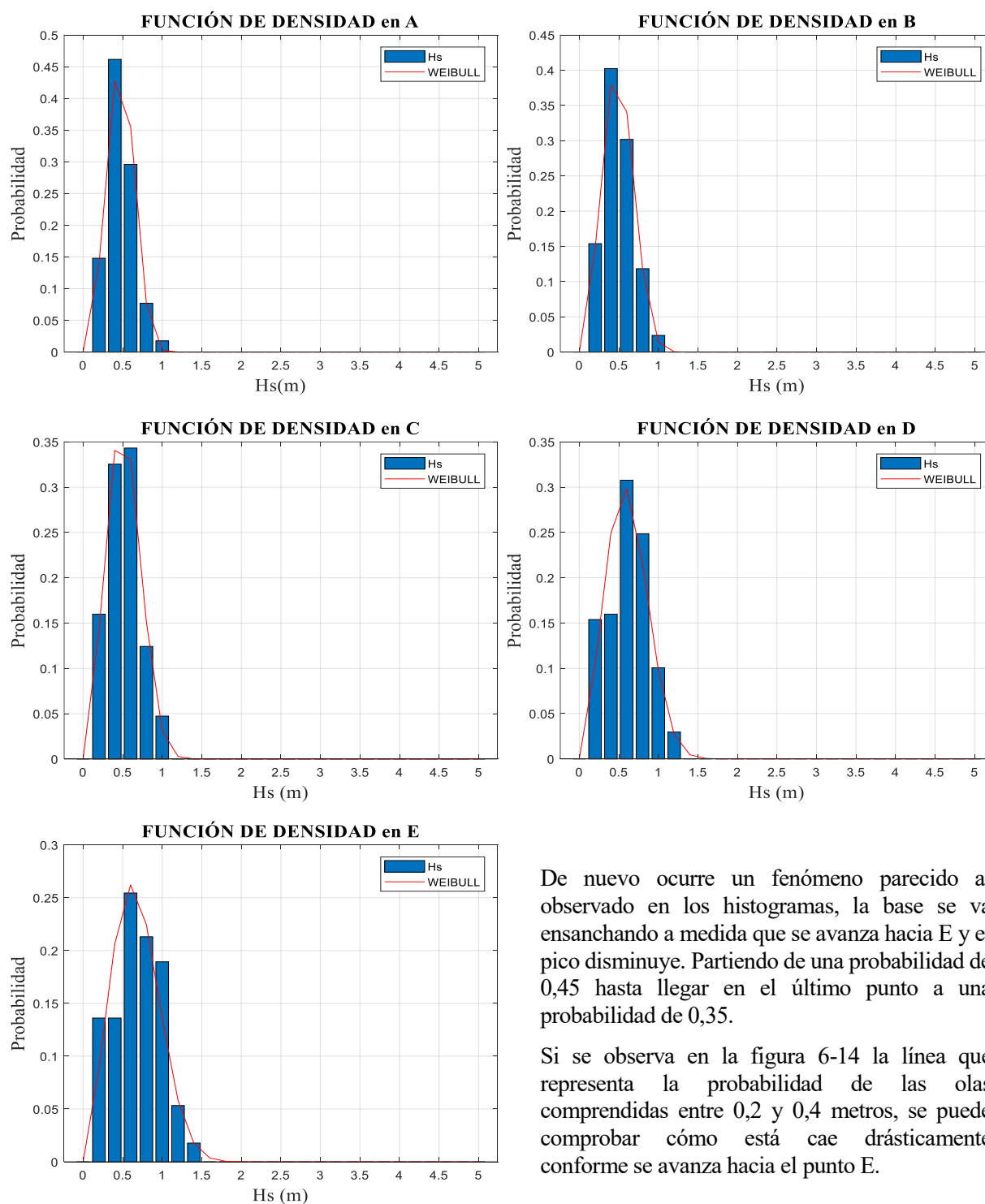


Figura 6-12. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 1)

6.1.2.2 Funciones de densidad de Weibull

Figura 6-13. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 1)



De nuevo ocurre un fenómeno parecido al observado en los histogramas, la base se va ensanchando a medida que se avanza hacia E y el pico disminuye. Partiendo de una probabilidad de 0,45 hasta llegar en el último punto a una probabilidad de 0,35.

Si se observa en la figura 6-14 la línea que representa la probabilidad de las olas comprendidas entre 0,2 y 0,4 metros, se puede comprobar cómo está cayendo drásticamente conforme se avanza hacia el punto E.

Tabla 6-6. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 1)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Densidad de probabilidad					
0 - 0.2	0.1479	0.1583	0.1598	0.1538	0.1361	0.15118
0.2 - 0.4	0.4615	0.4024	0.3254	0.1598	0.1361	0.29704
0.4 - 0.6	0.2959	0.3018	0.3432	0.3077	0.2544	0.3006
0.6 - 0.8	0.07622	0.1183	0.1243	0.2485	0.213	0.15606
0.8 - 1	0.01775	0.02367	0.04732	0.1006	0.1893	0.07573
1 - 1.2	0	0	0	0.02959	0.05325	0.01657
1.2 - 1.4	0	0	0	0	0.01775	0.00355
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

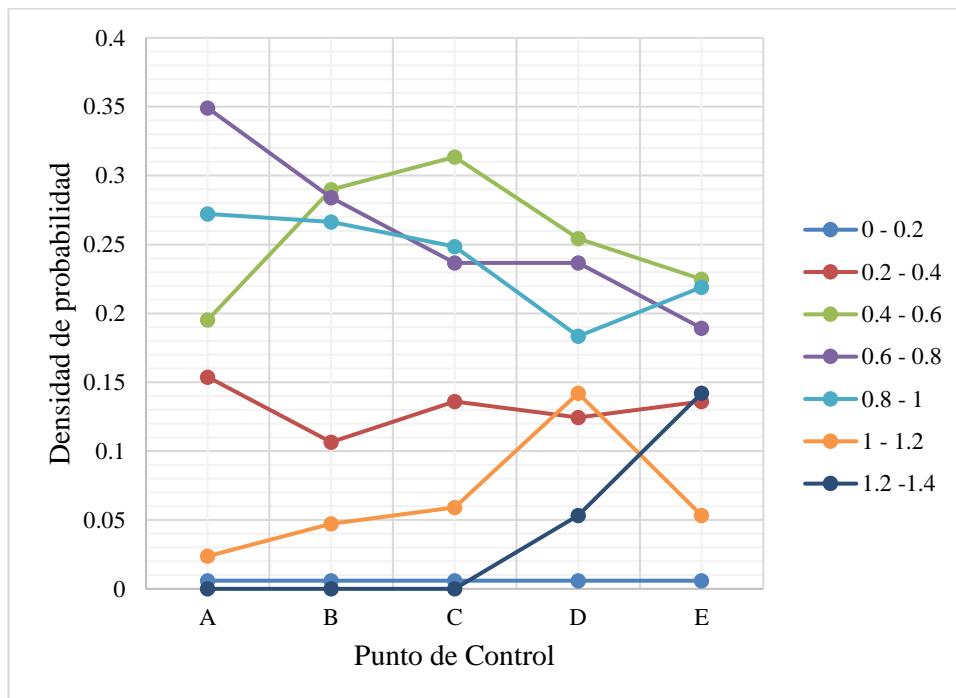
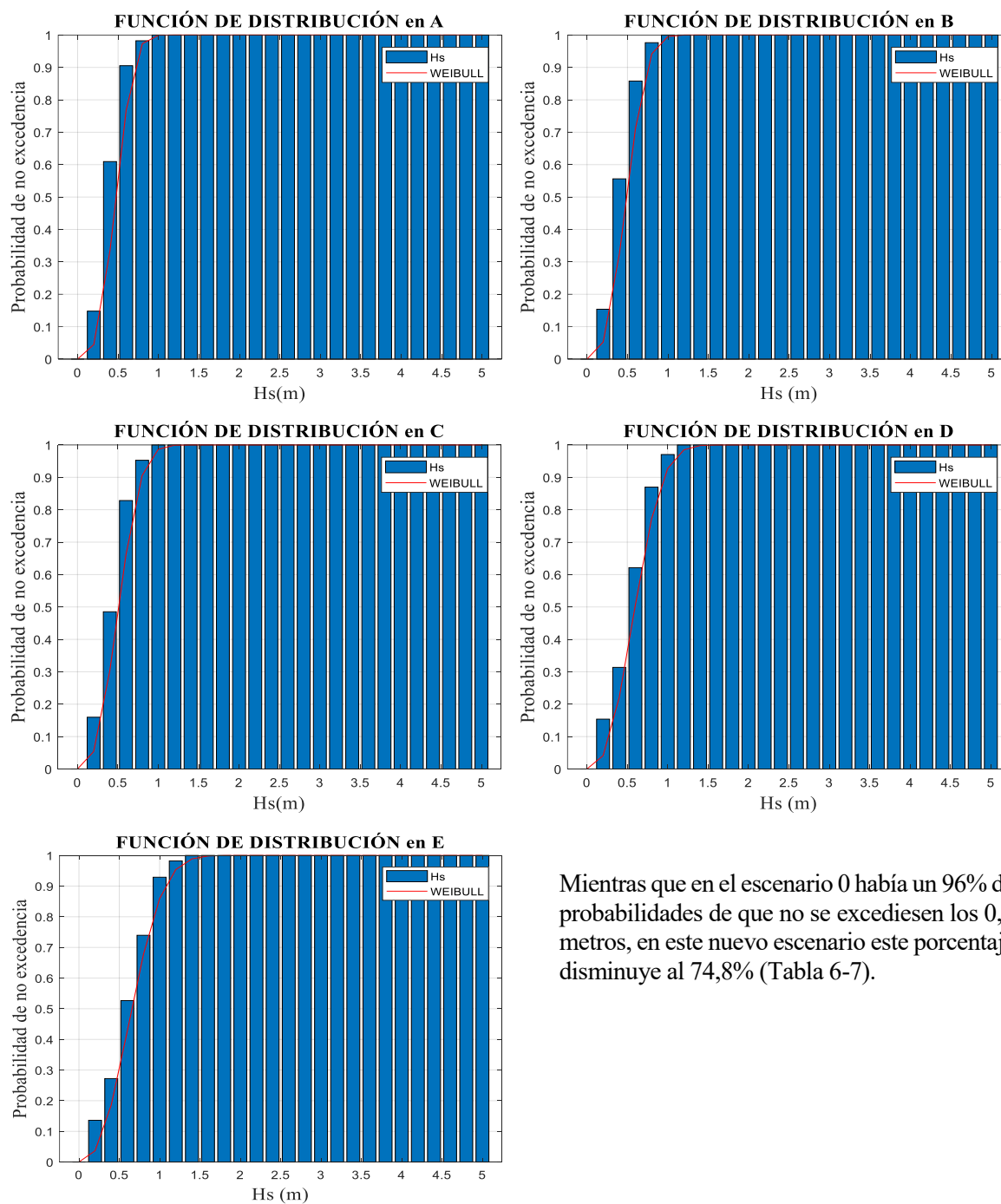


Figura 6-14. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 1)

6.1.2.3 Funciones de distribución de Weibull

Figura 6-15. Funciones de distribución (Escenario 1)



Mientras que en el escenario 0 había un 96% de probabilidades de que no se excediesen los 0,6 metros, en este nuevo escenario este porcentaje disminuye al 74,8% (Tabla 6-7).

Tabla 6-7. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 1)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Probabilidad de no excedencia					
0.2	0.1479	0.1538	0.1598	0.1538	0.1361	0.15028
0.4	0.6095	0.5562	0.4852	0.3136	0.2722	0.44734
0.6	0.9053	0.858	0.8284	0.6213	0.5266	0.74792
0.8	0.9822	0.9763	0.9527	0.8698	0.7396	0.90412
1	1	1	1	0.9704	0.929	0.97988
1.2	1	1	1	1	0.9822	0.99644
1.4	1	1	1	1	1	1

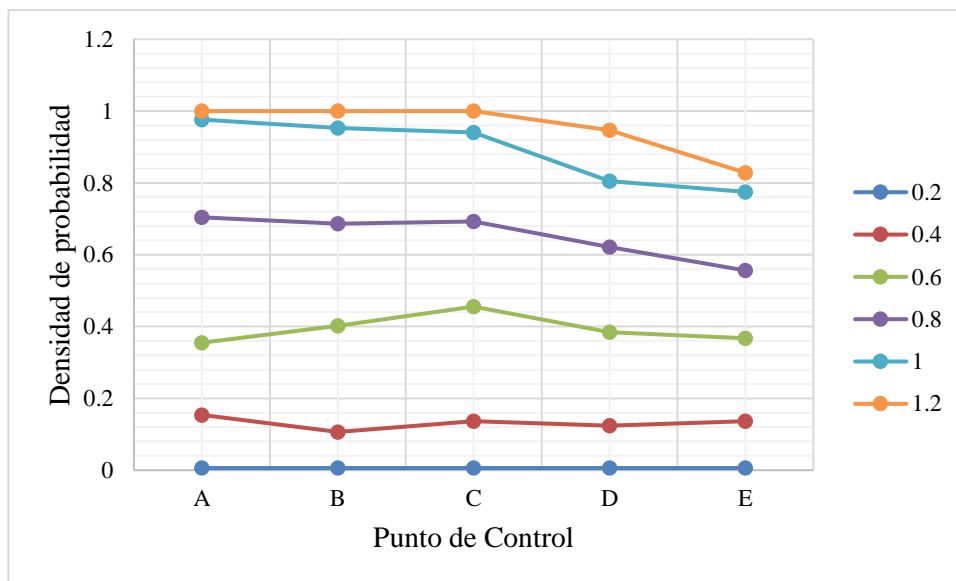


Figura 6-16. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 1)

6.1.2.4 Resultante Media Anual

Tabla 6-8. RMA (Escenario 1)

P.C	R _x (N/s)	R _y (N/s)	R (N/s)	γ (°)
A	24.4058	580.8570	581.3701	87.5940
B	90.8189	497.6118	505.8315	79.6568
C	219.0625	502.8664	584.5098	66.4607
D	254.1041	537.7434	594.7578	64.7075
E	530.8500	979.3777	1113.9939	61.5411



Figura 6-17. Vectores RMA (Escenario 1)

En este escenario el módulo de los vectores de la resultante media anual aumenta considerablemente respecto al escenario 0. Debido a este forzamiento se produce una mayor influencia energética, especialmente en los puntos más orientales de la costa, llegando a alcanzar los 1114 N/s aproximadamente (Tabla 6-8). La dirección parte del Norte en el punto A y va virando hacia el Este conforme se acerca al punto E. Por lo que el sedimento tiende a ir hacia el Norte en el primer punto y hacia el este de B a E (Figura 6-17).

6.1.3 Escenario 2

- Del 3 de noviembre de 2012 a las 00:00 al 10 de noviembre de 2012 a las 00:00

En esta serie temporal (Figura 6-18) de una semana de duración las alturas significantes de ola se encuentran comprendidas entre 0,2 y 3,8 metros.

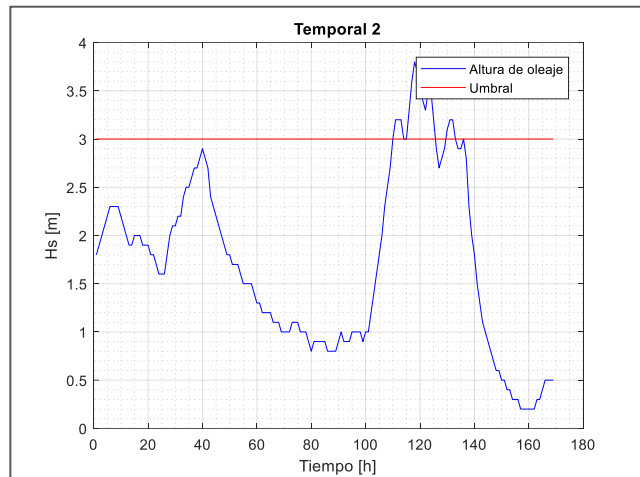
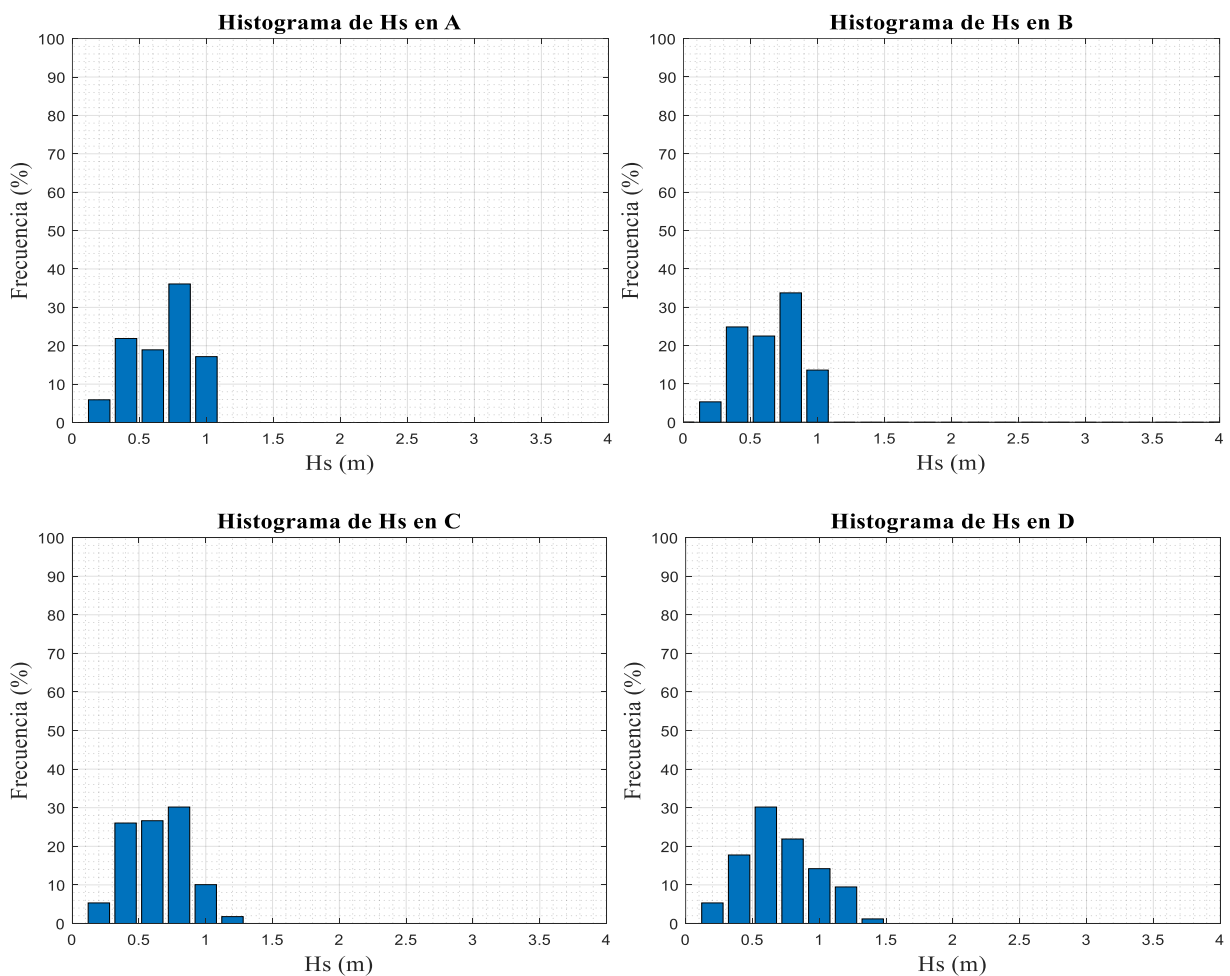
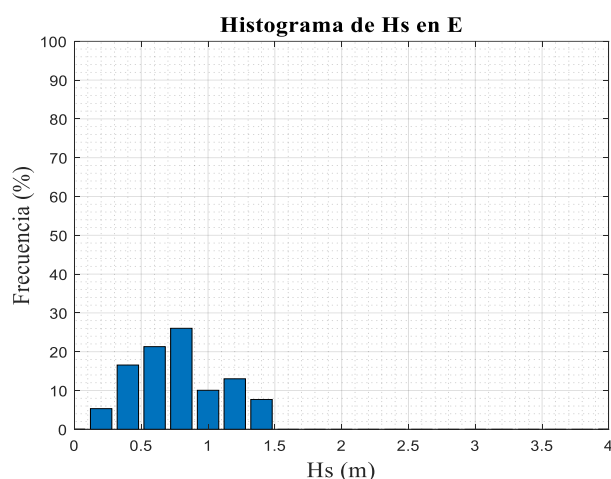


Figura 6-18. Serie temporal de altura significativa (Escenario 2)

6.1.3.1 Histogramas

Figura 6-19. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 2)





Estos histogramas sugieren una mayor variedad de alturas de oleaje lo que implica que tengan una frecuencia relativamente parecida. Es decir, a diferencia del escenario 0 donde el histograma estaba representado por tres barras y la frecuencia de uno de los rangos (0,4 – 0,6) sobresalía sobre el resto, en este caso las barras tienen alturas más parecidas ya que la frecuencia total (100%) debe repartirse entre más rangos de altura significativa (Figura 6-19).

Al igual que en los casos anteriores de A a E la base del histograma se va haciendo más ancha y el pico va disminuyendo. En el punto E llegan a producirse olas de hasta 1,2 - 1,4 metros,

aunque poco frecuentes son las más altas obtenidas hasta el momento.

Las olas más frecuentes para este temporal tienen una altura comprendida entre 0,6 y 0,8 metros, aunque su frecuencia es solo de 29,6% y las olas más pequeñas con una frecuencia de 5,44% se mantienen constantes en todos los puntos de control, a excepción del punto A donde la frecuencia es un poco mayor (Tabla 6-9).

Tabla 6-9. Tabla de frecuencias altimétricas (Escenario 2)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Frecuencia (%)					
0 - 0.2	5.92	5.32	5.32	5.32	5.32	5.44
0.2 - 0.4	21.89	24.85	26.04	17.75	16.57	21.42
0.4 - 0.6	18.93	22.49	26.63	30.18	21.3	23.91
0.6 - 0.8	36.1	33.73	30.18	21.89	26.04	29.59
0.8 - 1	17.16	13.61	10.06	14.2	10.06	13.018
1 - 1.2	0	0	1.77	9.47	13.02	4.85
1.2 - 1.4	0	0	0	1.18	7.69	1.77
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

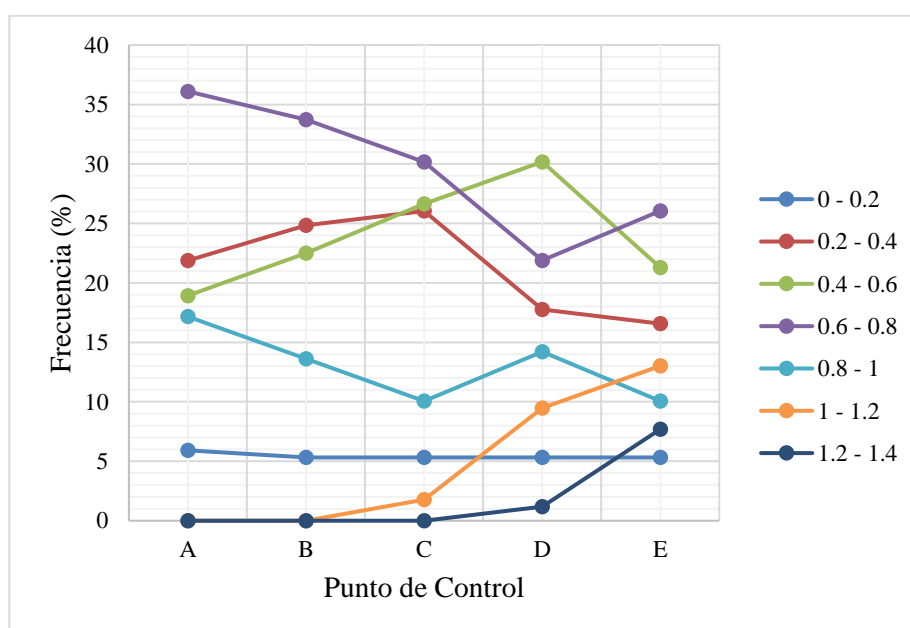
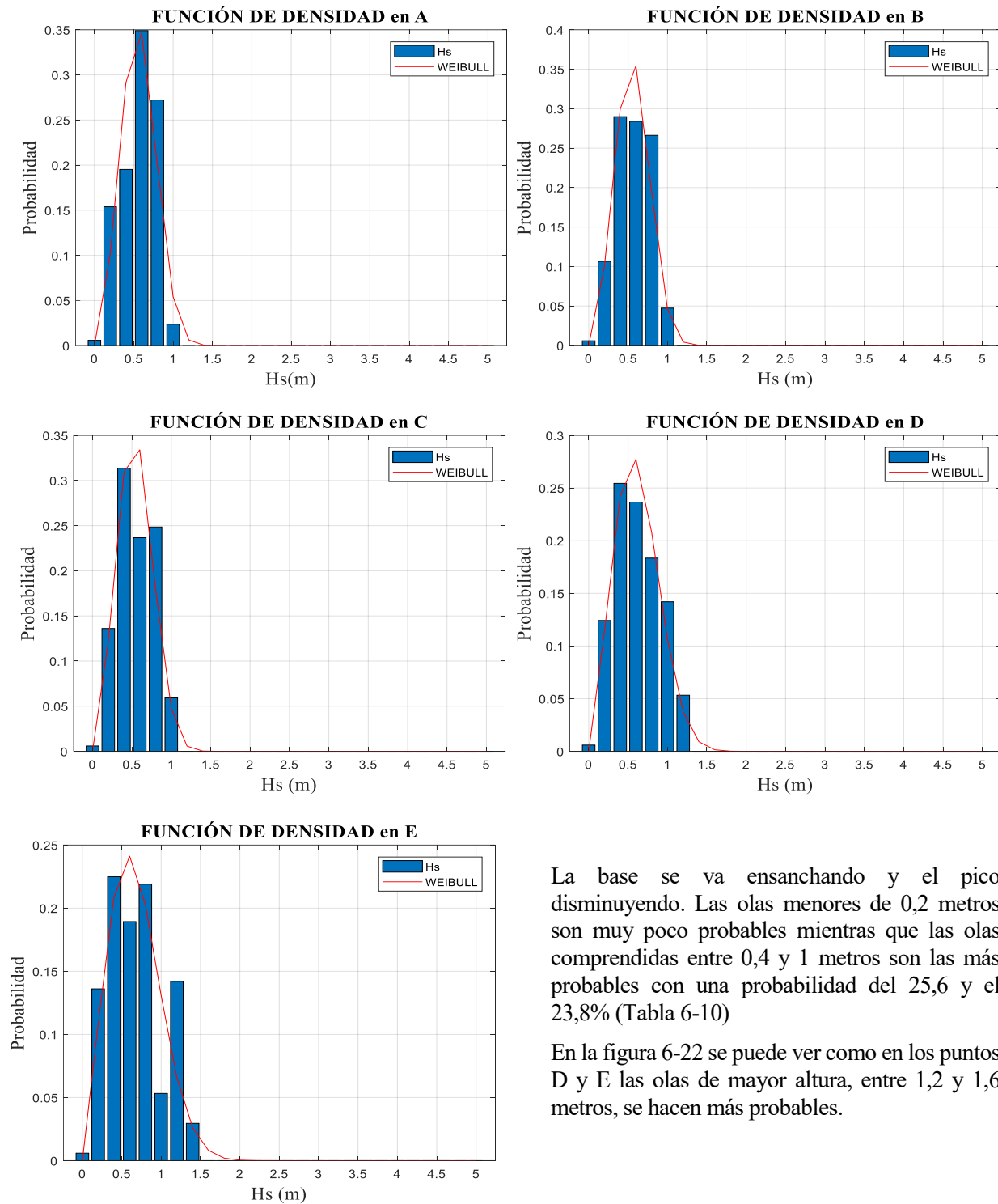


Figura 6-20. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 2)

6.1.3.2 Funciones de densidad de Weibull

Figura 6-21. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 2)



La base se va ensanchando y el pico disminuyendo. Las olas menores de 0,2 metros son muy poco probables mientras que las olas comprendidas entre 0,4 y 1 metros son las más probables con una probabilidad del 25,6 y el 23,8% (Tabla 6-10)

En la figura 6-22 se puede ver como en los puntos D y E las olas de mayor altura, entre 1,2 y 1,6 metros, se hacen más probables.

Tabla 6-10. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 2)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Densidad de probabilidad					
0 - 0.2	0.005917	0.005917	0.005917	0.005917	0.005917	0.00592
0.2 - 0.4	0.1538	0.1065	0.1361	0.1243	0.1361	0.13136
0.4 - 0.6	0.1953	0.2899	0.3136	0.2544	0.2249	0.25562
0.6 - 0.8	0.34910	0.284	0.2367	0.2367	0.1893	0.25916
0.8 - 1	0.2722	0.2663	0.2485	0.1834	0.2189	0.23786
1 - 1.2	0.02367	0.04734	0.05917	0.142	0.05325	0.06509
1.2 - 1.4	0	0	0	0.05325	0.142	0.03905
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0.02959	0.00592
1.6 - 1.8	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

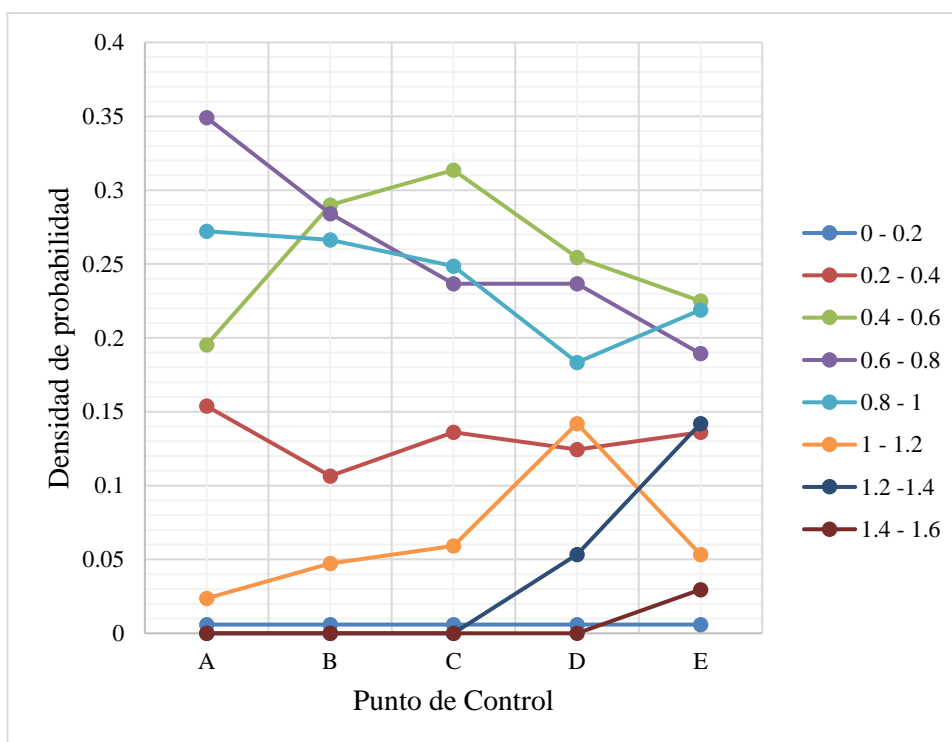
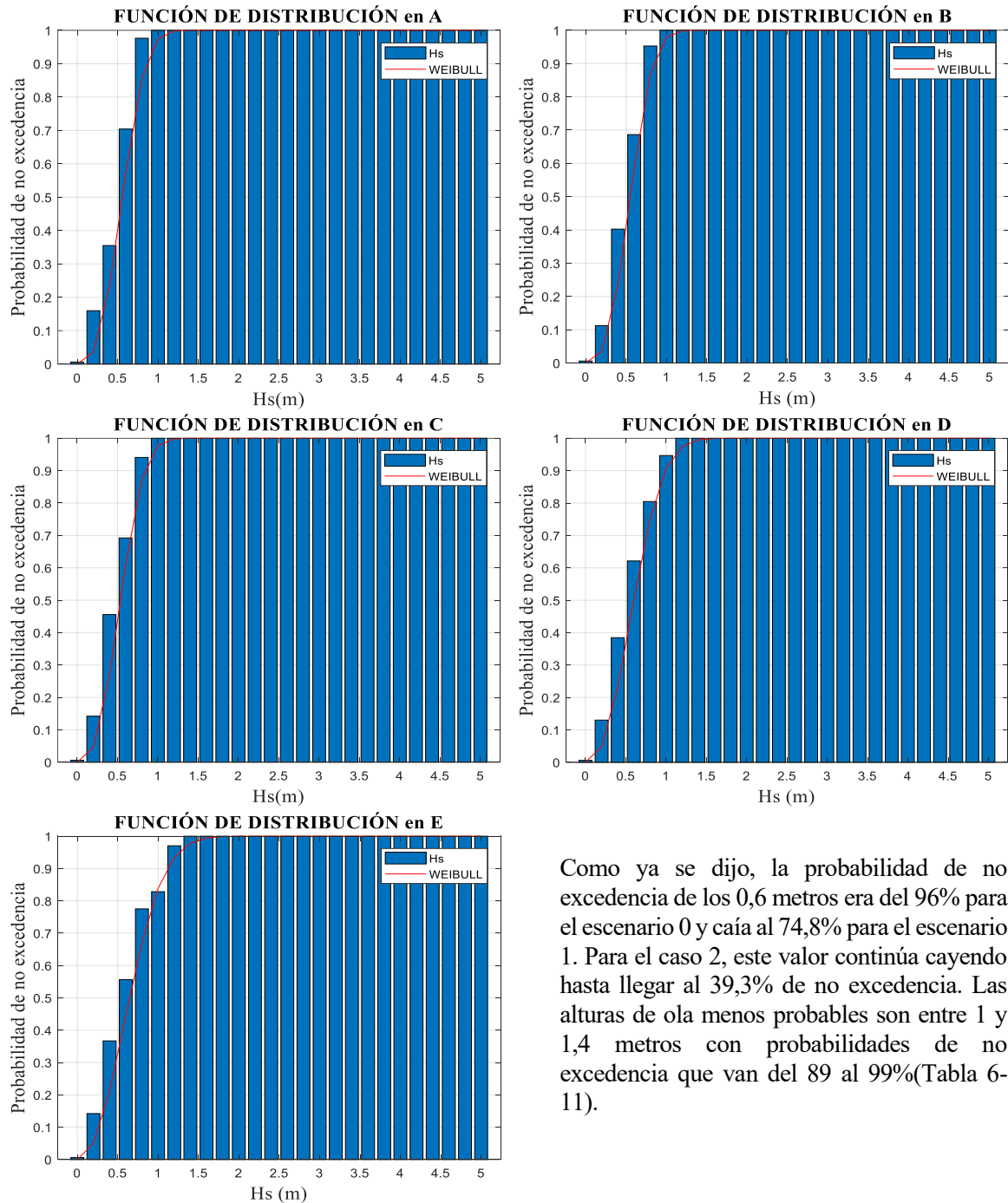


Figura 6-22. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 2)

6.1.3.3 Funciones de distribución de Weibull

Figura 6-23. Funciones de distribución (Escenario 2)



Como ya se dijo, la probabilidad de no excedencia de los 0,6 metros era del 96% para el escenario 0 y caía al 74,8% para el escenario 1. Para el caso 2, este valor continúa cayendo hasta llegar al 39,3% de no excedencia. Las alturas de ola menos probables son entre 1 y 1,4 metros con probabilidades de no excedencia que van del 89 al 99%(Tabla 6-11).

Tabla 6-11. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 2)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Probabilidad de no excedencia					
0.2	0.005917	0.005917	0.005917	0.005917	0.005917	0.00592
0.4	0.1598	0.1124	0.142	0.1302	0.142	0.13728
0.6	0.355	0.4024	0.4556	0.3846	0.3669	0.3929
0.8	0.7041	0.6864	0.6923	0.6213	0.5562	0.65206
1	0.9763	0.9527	0.9408	0.8047	0.7751	0.88992
1.2	1	1	1	0.9467	0.8284	0.95502
1.4	1	1	1	1	0.9704	0.99408
1.6	1	1	1	1	1	1

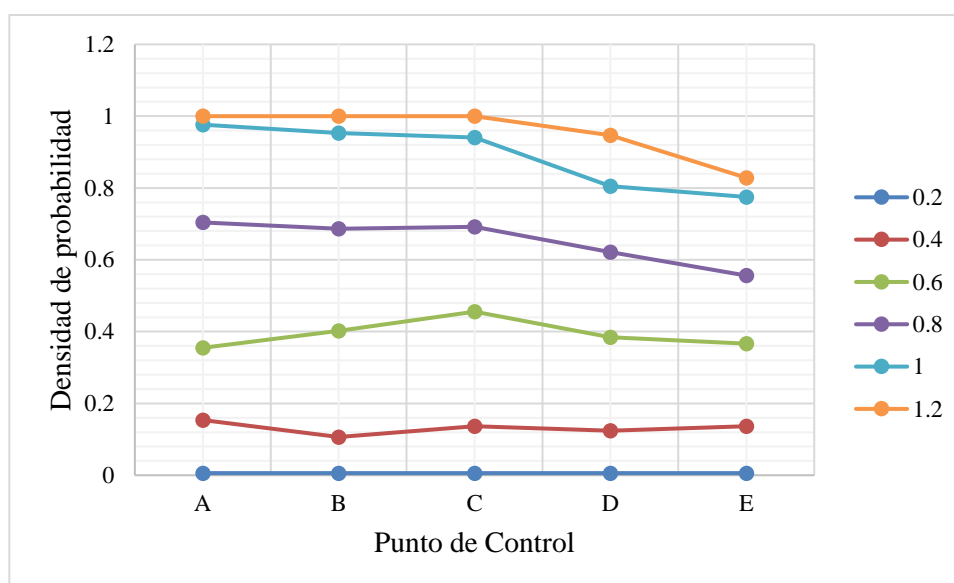


Figura 6-24. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 2)

6.1.3.4 Resultante Media Anual

Tabla 6-12. RMA (Escenario 2)

P.C	Rx (N/s)	Ry (N/s)	R (N/s)	Ángulo (°)
A	207.9233	710.9233	740.4169	73.6909
B	126.2603	649.0708	661.2372	78.9920
C	176.3420	659.4017	682.5739	75.0279
D	189.9807	655.6873	682.6555	73.8414
E	394.4615	126.3059	1307.2407	72.4372



Figura 6-25. Vectores RMA (Escenario 2)

En el primer punto de este apartado se hablaba de que en este escenario se alcanzaban las alturas significantes de ola más altas, llegando al rango de 1,2 – 1,4 en los puntos D y E, con frecuencias de del 1,18% y del 7,69% respectivamente. Este oleaje produce una influencia energética mayor que en los dos casos anteriores. En este caso, además, como el escenario 0, todos los vectores apuntan al Noreste y como en el escenario 1 el modulo aumenta conforme se avanza al punto E (Figura 6-25).

6.1.4 Escenario 3

- Del 19 de noviembre de 2007 a las 00:00 al 26 de noviembre de 2007 a las 00:00

En esta serie temporal (Figura 6-26) de una semana de duración las alturas significantes de ola se encuentran comprendidas entre 0,3 y 3,2 metros. En este escenario el umbral es traspasado por poco y durante poco tiempo.

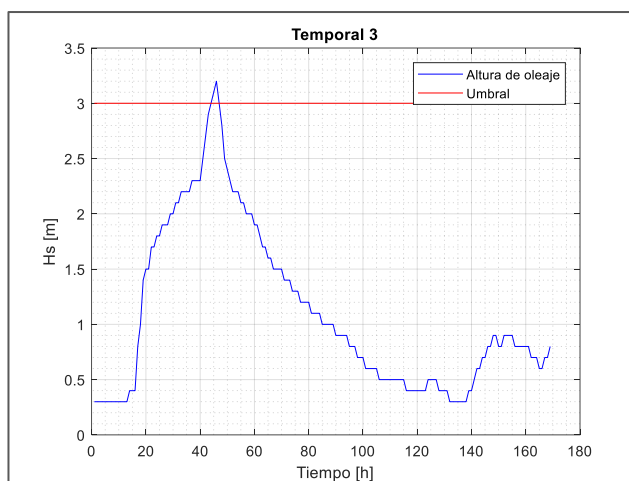
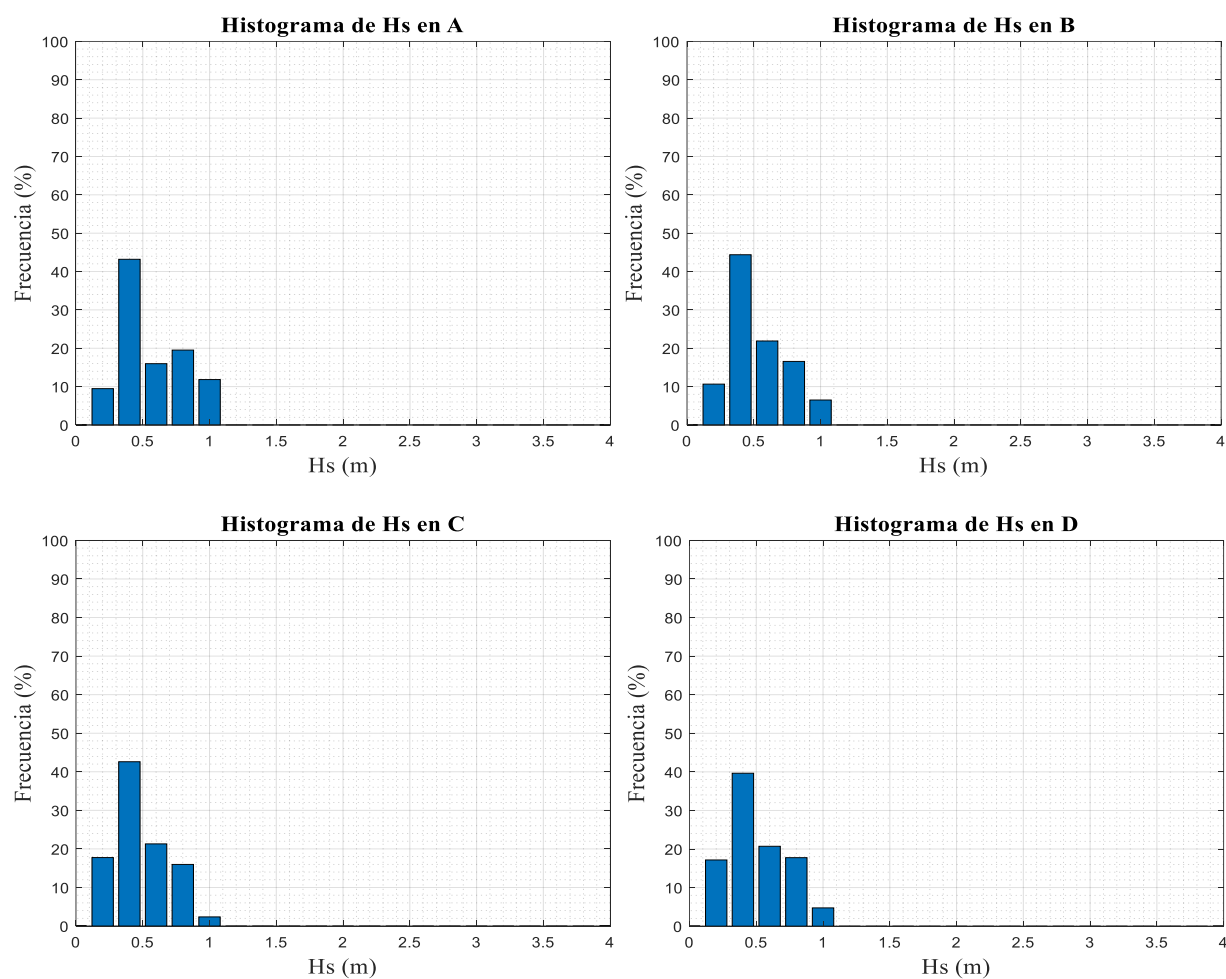
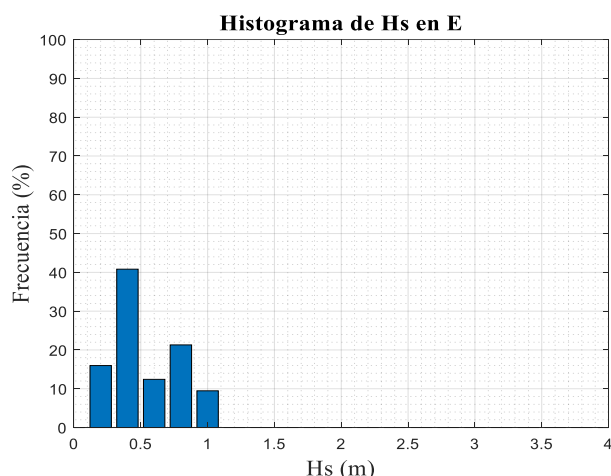


Figura 6-26. Serie temporal de altura significativa (Escenario 3)

6.1.4.1 Histogramas

Figura 6-27. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 3)





En el escenario 2 los histogramas mantienen la anchura de la base fija, no va aumentando como en los casos anteriores y la altura máxima de ola que se alcanza es 1 metro. El pico de los histogramas también se mantiene estable entorno al 40 % en todos los puntos para el rango de alturas 0,2 – 0,4 metros.

Observando la figura 6-28 se ve como el rango de alturas más frecuente es el de 0,2 – 0,4 metros con un 42,13% de media para toda la costa (Tabla 6-13). También se puede ver como la frecuencia del resto de rangos se mantiene relativamente constante a excepción de las olas

comprendidas entre 0,8 y 1 metros que son más frecuentes en los extremos A y E que por el centro de la playa.

Tabla 6-13. Tabla de frecuencias altimétricas (Escenario 3)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Frecuencia (%)					
0 - 0.2	9.47	10.65	17.75	17.16	15.98	14.202
0.2 - 0.4	43.2	44.38	42.6	39.64	40.83	42.13
0.4 - 0.6	15.98	21.89	21.3	20.71	12.43	18.462
0.6 - 0.8	19.53	16.57	15.98	17.75	21.3	18.226
0.8 - 1	11.83	6.51	2.37	4.73	9.47	6.982
1 - 1.2	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

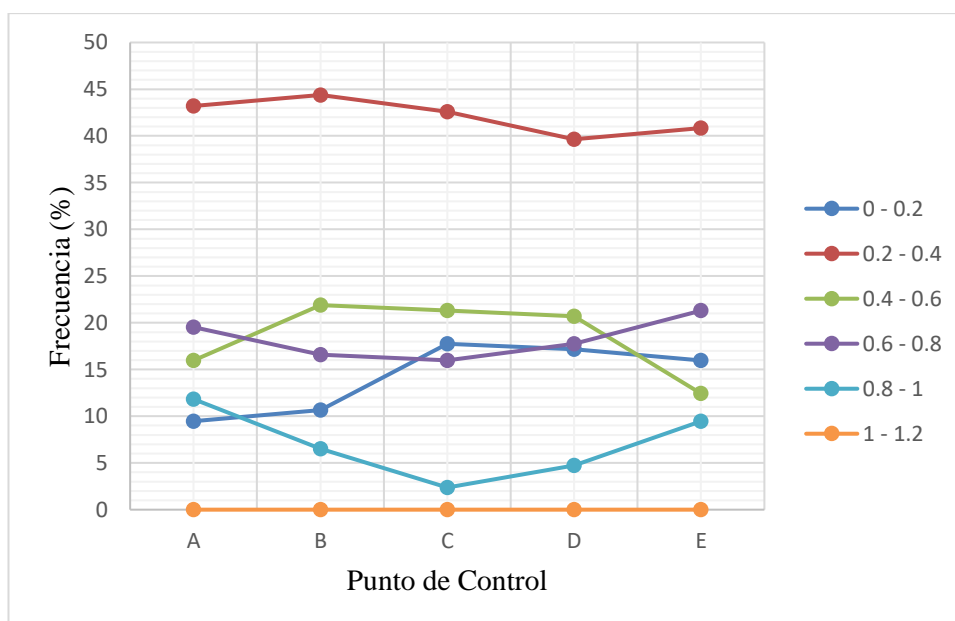
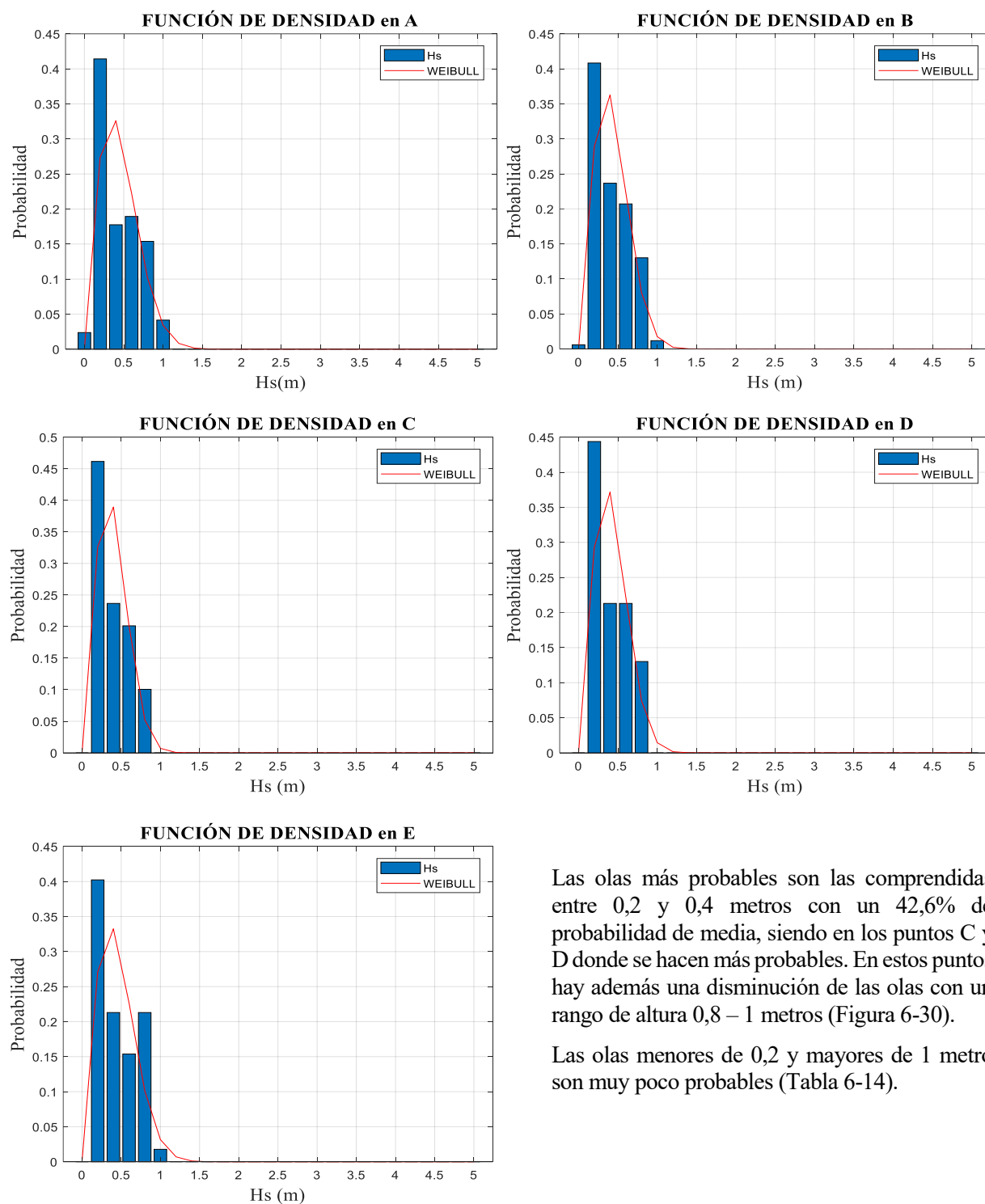


Figura 6-28. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 3)

6.1.4.2 Funciones de densidad de Weibull

Figura 6-29. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 3)



Las olas más probables son las comprendidas entre 0,2 y 0,4 metros con un 42,6% de probabilidad de media, siendo en los puntos C y D donde se hacen más probables. En estos puntos hay además una disminución de las olas con un rango de altura 0,8 – 1 metros (Figura 6-30).

Las olas menores de 0,2 y mayores de 1 metro son muy poco probables (Tabla 6-14).

Tabla 6-14. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 3)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Densidad de probabilidad					
0 - 0.2	0.02367	0.005917	0	0	0	0.00592
0.2 - 0.4	0.4142	0.4083	0.4615	0.4438	0.4024	0.42604
0.4 - 0.6	0.1775	0.2367	0.2367	0.213	0.213	0.21538
0.6 - 0.8	0.1893	0.2071	0.2012	0.213	0.1538	0.19288
0.8 - 1	0.1538	0.1302	0.1006	0.1302	0.213	0.14556
1 - 1.2	0.04142	0.01183	0	0	0.01775	0.0142
1.2 - 1.4	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1	1	1	1	1	1

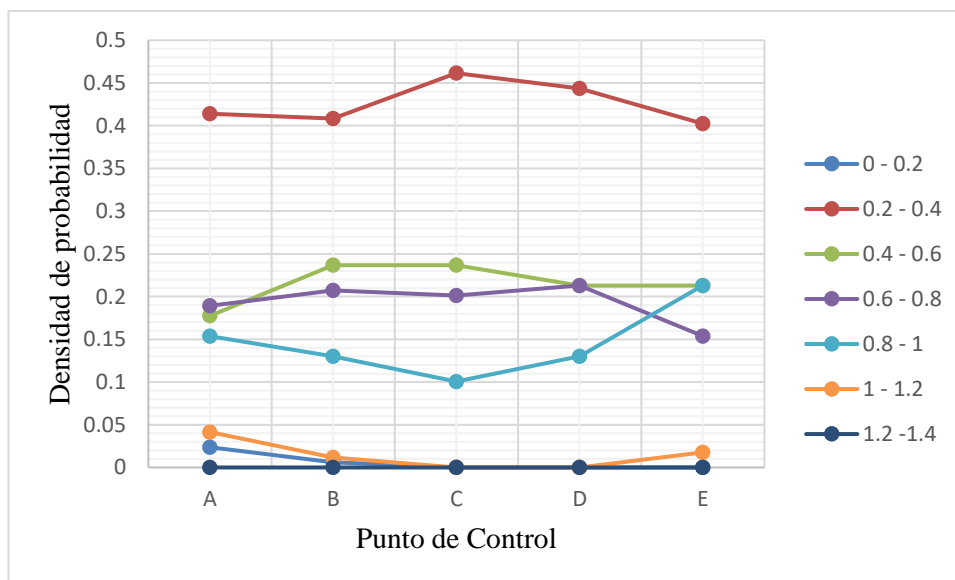
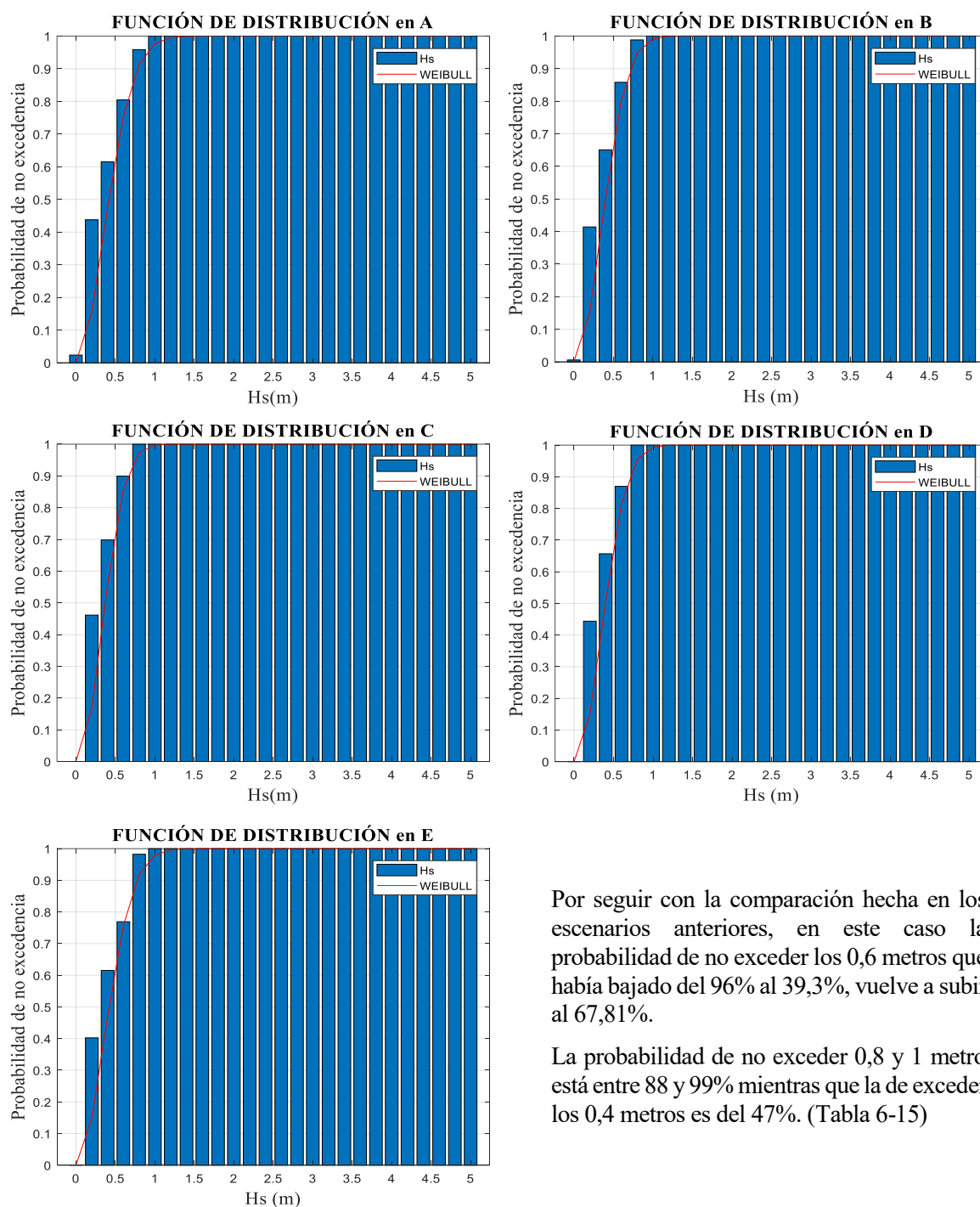


Figura 6-30. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 3)

6.1.4.3 Funciones de distribución de Weibull

Figura 6-31. Funciones de distribución (Escenario 3)



Por seguir con la comparación hecha en los escenarios anteriores, en este caso la probabilidad de no exceder los 0,6 metros que había bajado del 96% al 39,3%, vuelve a subir al 67,81%.

La probabilidad de no exceder 0,8 y 1 metro está entre 88 y 99% mientras que la de exceder los 0,4 metros es del 47%. (Tabla 6-15)

Tabla 6-15. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 3)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Probabilidad de no excedencia					
0.2	0.02367	0.005917	0	0	0.4024	0.0864
0.4	0.4379	0.4142	0.4615	0.4438	0.6154	0.47456
0.6	0.6154	0.6509	0.6982	0.6568	0.7692	0.6781
0.8	0.8047	0.858	0.8994	0.8698	0.9822	0.88282
1	0.9586	0.9882	1	1	1	0.98936
1.2	1	1	1	1	1	1

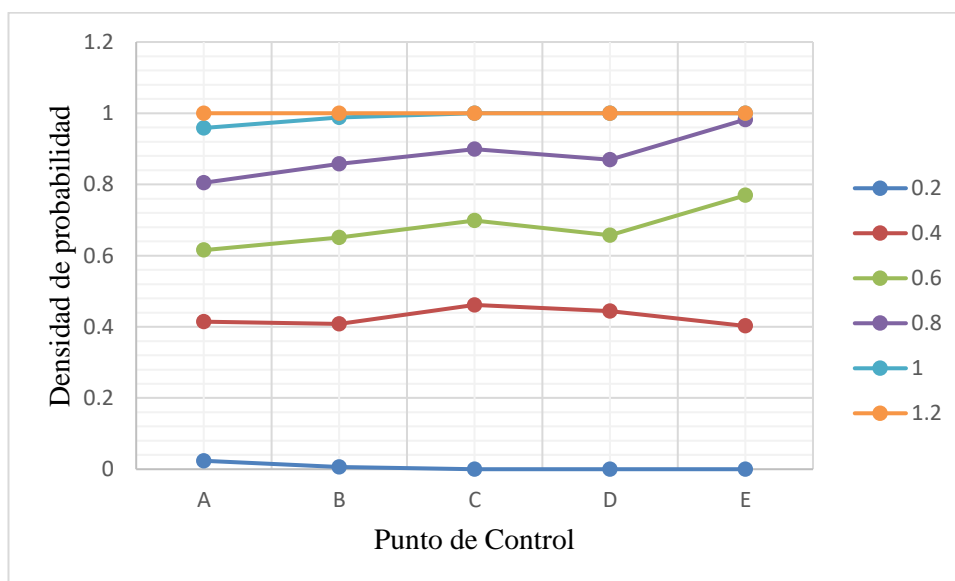


Figura 6-32. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 3)

6.1.4.4 Resultante Media Anual

Tabla 6-16. RMA (Escenario 3)

P.C	Rx (N/s)	Ry (N/s)	R (N/s)	Ángulo (°)
A	205.0162	434.2442	480.2079	64.7270
B	74.7382	406.9445	413.2079	79.5932
C	36.8404	416.8129	418.4379	84.9490
D	24.6474	372.0536	372.8691	86.2099
E	30.7780	706.6560	707.3259	87.5061



Figura 6-33. Vectores RMA (Escenario 3)

Para este escenario se han obtenido módulos de mayor magnitud que para el escenario 0, sin embargo, dado que en este caso el umbral se traspasaba por poco y por poco tiempo, estos módulos son menores que los obtenidos en los escenarios 1 y 2. El punto de control donde hay mayor influencia energética es el punto E como viene siendo habitual, y el de menor influencia es el punto D, ya que tiene el módulo más pequeño (Tabla 6-16).

El efecto en la dirección de propagación del sedimento es inverso al visto en el escenario 1, en este caso la dirección va virando de dirección Noreste a dirección Norte conforme se avanza al punto E (Figura 6-33).

6.1.5 Escenario 4

- Del 25 de octubre de 2003 a las 00:00 al 1 de noviembre de 2003 a las 00:00

En esta serie temporal (Figura 6-34) de una semana de duración las alturas significantes de ola se encuentran comprendidas entre 0,1 y 3,9 metros. Esta serie temporal es la que registra las mayores alturas.

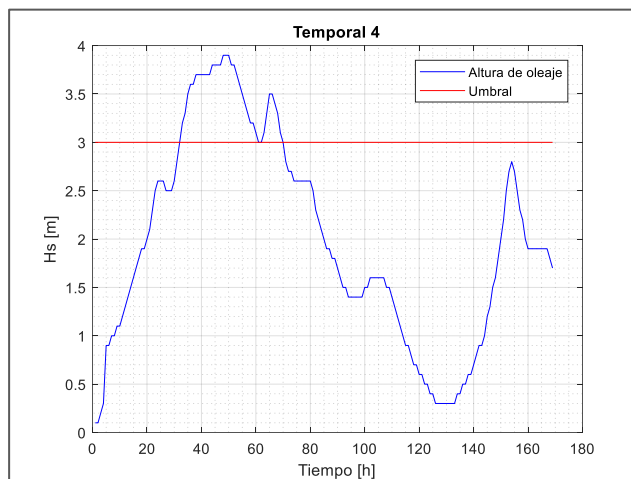
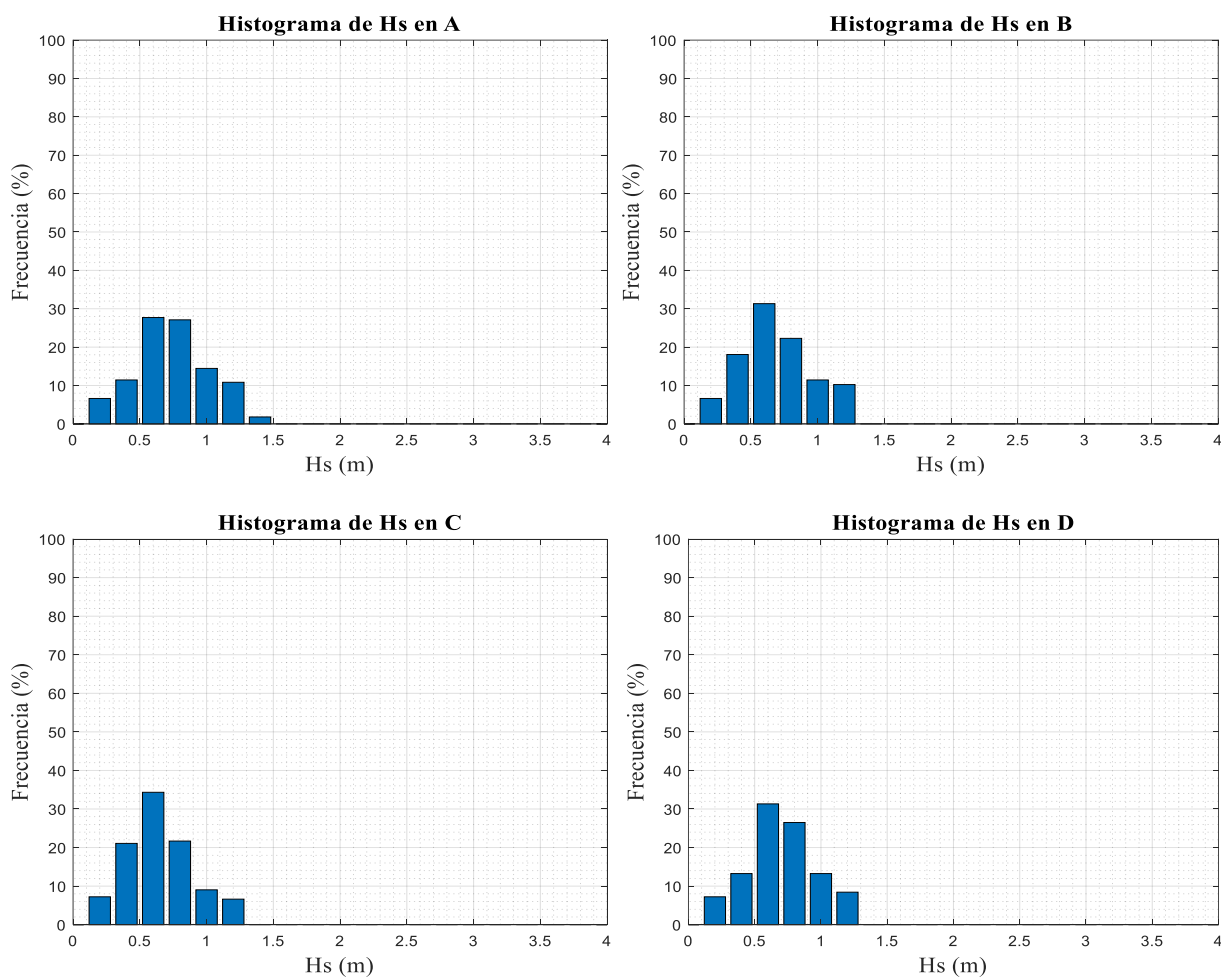
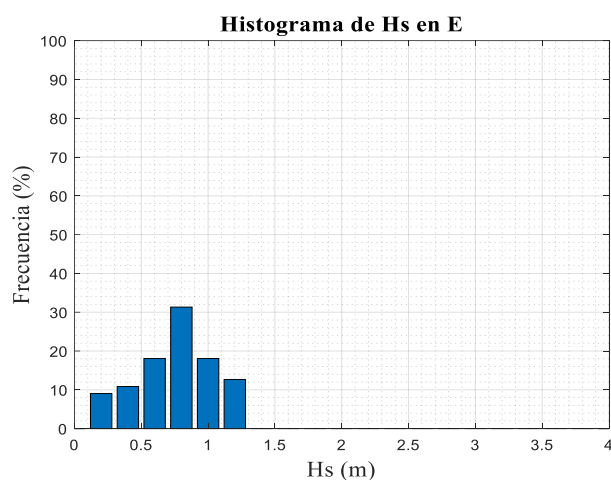


Figura 6-34. Serie temporal de altura significativa (Escenario 4)

6.1.5.1 Histogramas

Figura 6-35. Histogramas de frecuencias altimétricas (Escenario 4)





En el escenario 4 los histogramas tienen una forma parecida. El rango de altura máximo que se alcanza es 1,2 – 1,4 metro son el punto A, mientras que en el resto de puntos es el rango 1 – 1,2, sin embargo, estos rangos representan el 0,36 y 9,76 % de frecuencia respectivamente (Tabla 6-17).

Las olas más frecuentes en la costa para este cuarto forzamiento son las comprendidas entre 0,4 y 0,6 metros. Sin embargo, en el punto E, la frecuencia de estas olas decae y aumenta la de las olas de entre 0,6 y 0,8 metros (Figura 6-36).

Tabla 6-17. Tabla de frecuencias altimétricas (Escenario 4)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Frecuencia (%)					
0 - 0.2	6.63	6.63	7.23	7.23	9.04	7.352
0.2 - 0.4	11.45	18.07	21.08	13.25	10.84	14.938
0.4 - 0.6	27.71	31.33	34.34	31.33	18.07	28.56
0.6 - 0.8	27.11	22.29	21.69	26.51	31.33	25.79
0.8 - 1	14.46	11.45	9.04	13.25	18.07	13.25
1 - 1.2	10.84	10.24	6.63	8.43	12.65	9.76
1.2 - 1.4	1.81	0	0	0	0	0.36
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

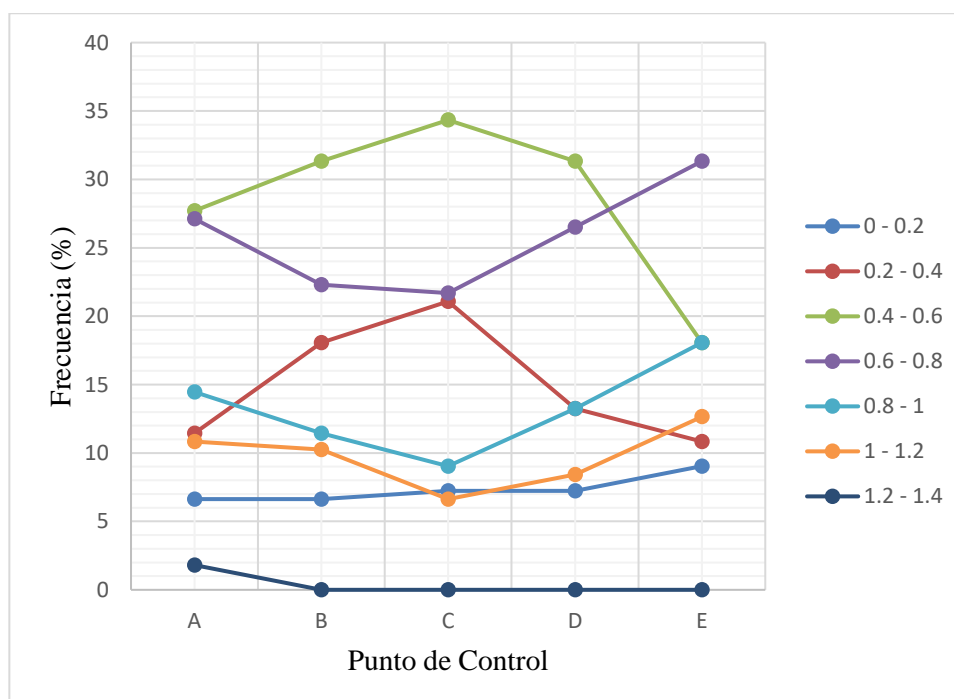
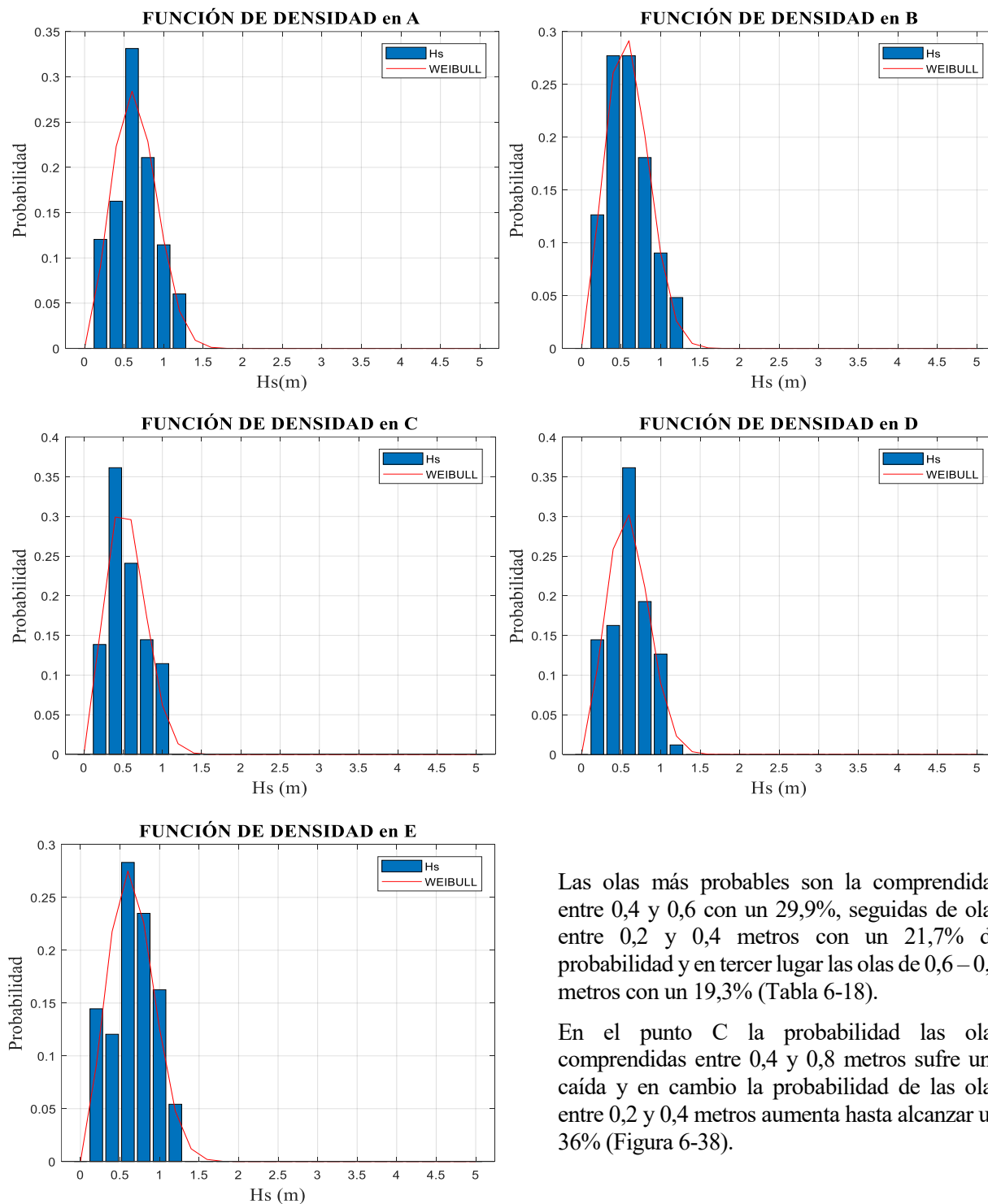


Figura 6-36. Tendencia de la frecuencia de los rangos de Hs (Escenario 4)

6.1.5.2 Funciones de densidad de Weibull

Figura 6-37. Funciones de densidad de Weibull (Escenario 4)



Las olas más probables son la comprendidas entre 0,4 y 0,6 con un 29,9%, seguidas de olas entre 0,2 y 0,4 metros con un 21,7% de probabilidad y en tercer lugar las olas de 0,6–0,8 metros con un 19,3% (Tabla 6-18).

En el punto C la probabilidad las olas comprendidas entre 0,4 y 0,8 metros sufre una caída y en cambio la probabilidad de las olas entre 0,2 y 0,4 metros aumenta hasta alcanzar un 36% (Figura 6-38).

Tabla 6-18. Tabla de densidad de probabilidad (Escenario 4)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Densidad de probabilidad					
0 - 0.2	0.1205	0.1265	0.1386	0.1446	0.1446	0.13496
0.2 - 0.4	0.1627	0.2771	0.3614	0.1627	0.1205	0.21688
0.4 - 0.6	0.3313	0.2771	0.241	0.3614	0.2831	0.29878
0.6 - 0.8	0.2108	0.1807	0.1446	0.1928	0.2349	0.19276
0.8 - 1	0.1145	0.09036	0.1145	0.1265	0.1627	0.12171
1 - 1.2	0.06024	0.04819	0	0.01205	0.05422	0.03494
1.2 -1.4	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1	1	1	1	1	1

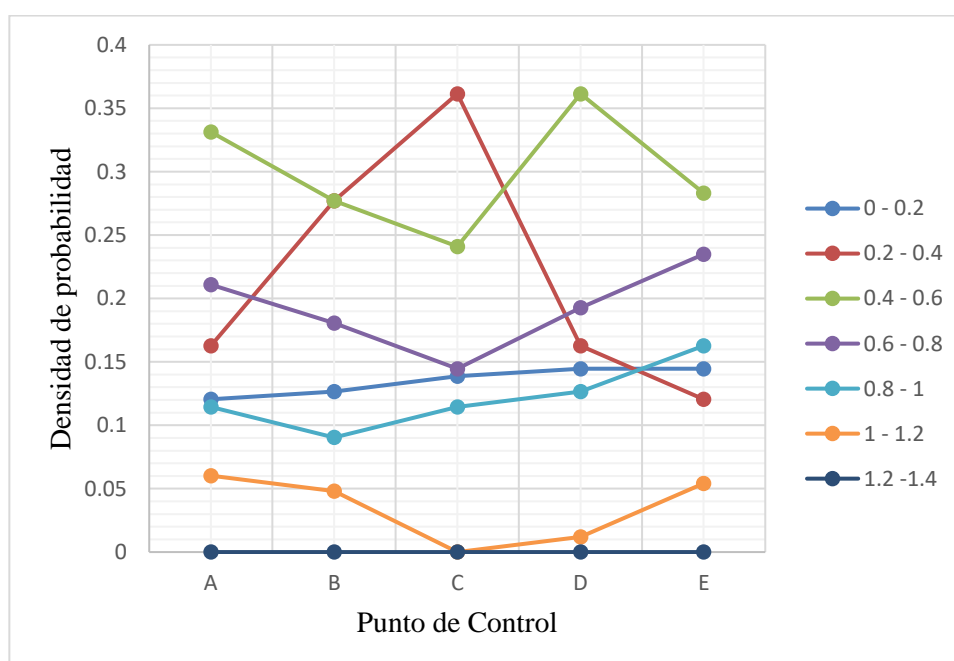
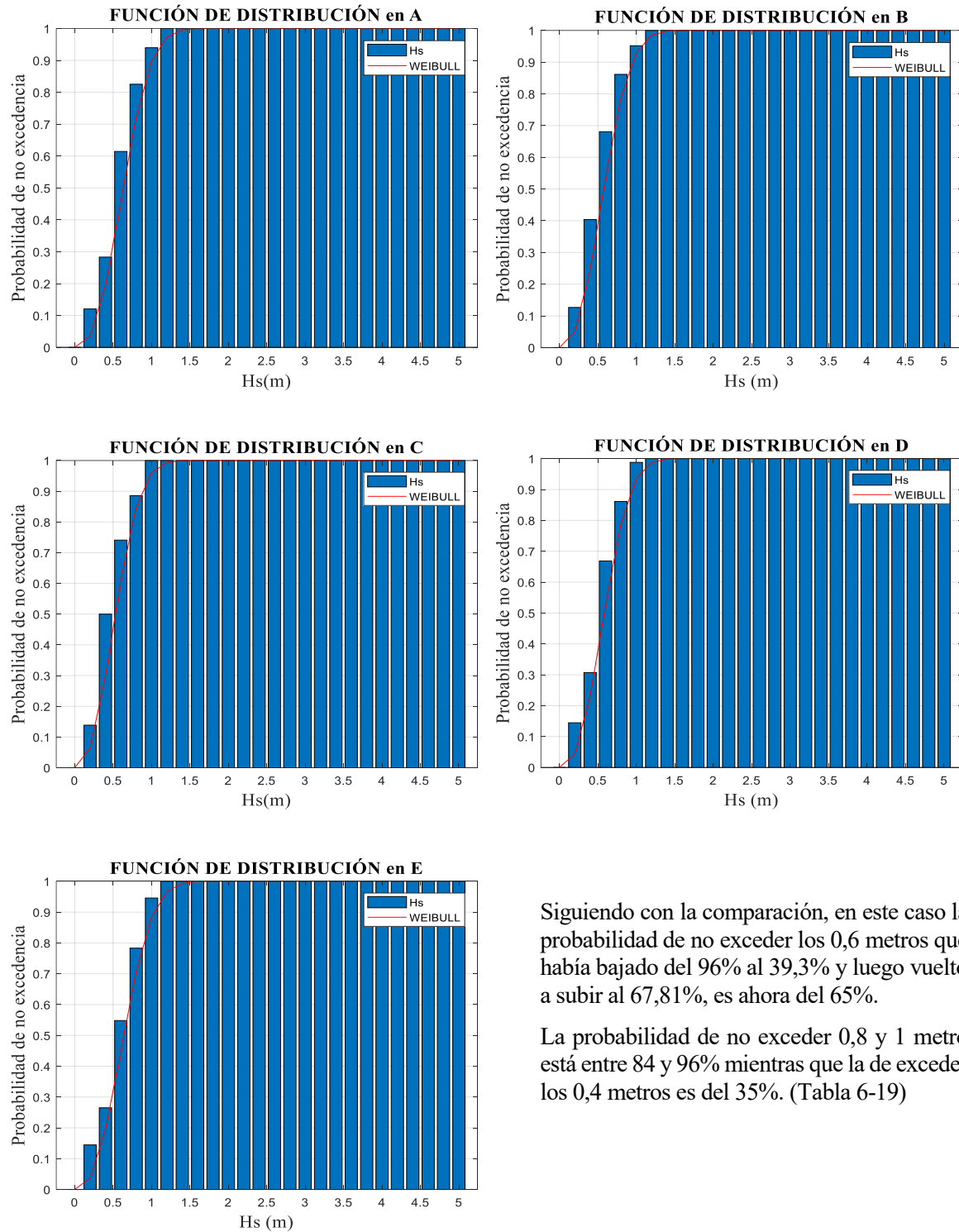


Figura 6-38. Tendencia de la densidad de probabilidad (Escenario 4)

6.1.5.3 Funciones de distribución de Weibull

Figura 6-39. Funciones de distribución (Escenario 4)



Siguiendo con la comparación, en este caso la probabilidad de no exceder los 0,6 metros que había bajado del 96% al 39,3% y luego vuelto a subir al 67,81%, es ahora del 65%.

La probabilidad de no exceder 0,8 y 1 metro está entre 84 y 96% mientras que la de exceder los 0,4 metros es del 35%. (Tabla 6-19)

Tabla 6-19. Tabla de probabilidad de no excedencia (Escenario 4)

	A	B	C	D	E	Media
Hs (m)	Probabilidad de no excedencia					
0.2	0.1205	0.1265	0.1386	0.1446	0.1446	0.13496
0.4	0.2831	0.4036	0.5	0.3072	0.2651	0.3518
0.6	0.6145	0.6807	0.741	0.6687	0.5482	0.65062
0.8	0.8253	0.8614	0.8855	0.8614	0.7831	0.84334
1	0.9398	0.9518	1	0.988	0.9458	0.96508
1.2	1	1	1	1	1	1

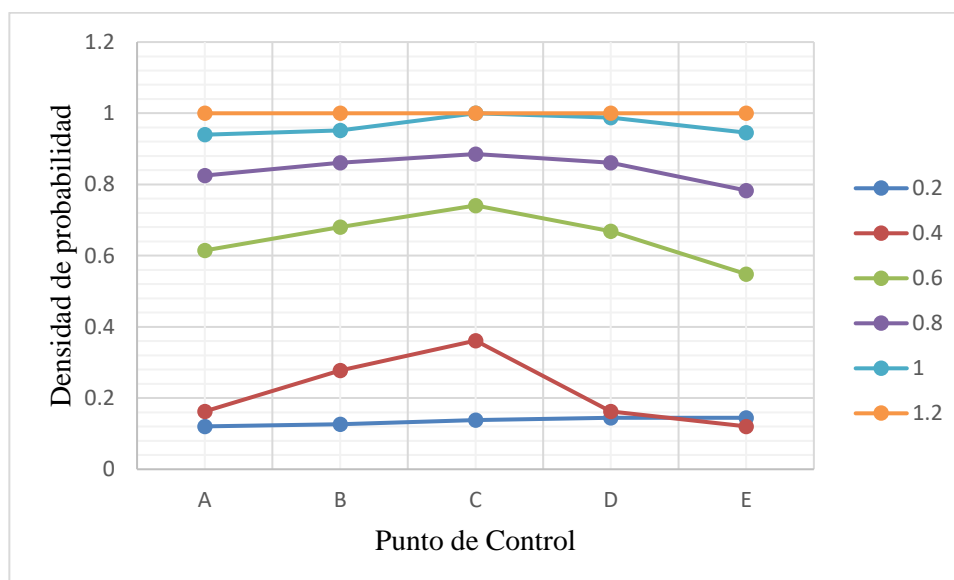


Figura 6-40. Tendencia de la probabilidad de no excedencia (Escenario 4)

6.1.5.4 Resultante Media Anual

Tabla 6-20. RMA (Escenario 4)

P.C	Rx (N/s)	Ry (N/s)	R (N/s)	Ángulo (°)
A	352.2646	825.6106	897.6208	66.8934
B	127.8731	757.1504	767.8726	80.4139
C	59.8140	778.8877	781.1810	85.6086
D	41.5909	720.2275	721.4274	86.6950
E	61.4938	1385.2459	1386.6101	87.4582



Figura 6-41. Vectores RMA (Escenario 4)

En este caso la frecuencia de las olas comprendidas entre 1,2 y 1,4 es menor que en el escenario 2, si en el escenario 2 se hablaba de un 1,77% de media en este caso se habla del 0,36%. Sin embargo, esto no significa que la RMA vaya a ser menor en este caso ya que, como se vio en la serie temporal (Figura 6-34) se alcanzan valores intermedios de altura con más frecuencia y el oleaje permanece más tiempo por encima del umbral de 3 metros. Esto significa que el módulo de la resultante media anual en los puntos de control es mayor en este escenario, que en los anteriores. Los máximos de este módulo vuelven a darse en los puntos más exteriores, A y E (Tabla 6-20).

Al igual que en escenario anterior, la dirección parte del Noreste y va cambiando hasta alcanzar dirección Norte en el punto E (Figura 6-41).

6.1.6 Comparación de resultados

Tabla 6-21. Tabla comparativa de alturas significantes medias según escenarios

Hs media (m)	Escenarios				
	0	1	2	3	4
0 - 0.2	31.72	2.72	5.44	14.20	7.35
0.2 - 0.4	53.25	23.91	21.42	42.13	14.94
0.4 - 0.6	14.79	36.33	23.91	18.46	28.56
0.6 - 0.8	0.236	20.59	29.59	18.23	25.79
0.8 - 1	0	11.6	13.02	6.98	13.25
1 - 1.2	0	3.9	4.85	0	9.76
1.2 - 1.4	0	0.95	1.77	0	0.36
1.4 - 1.6	0	0	0	0	0

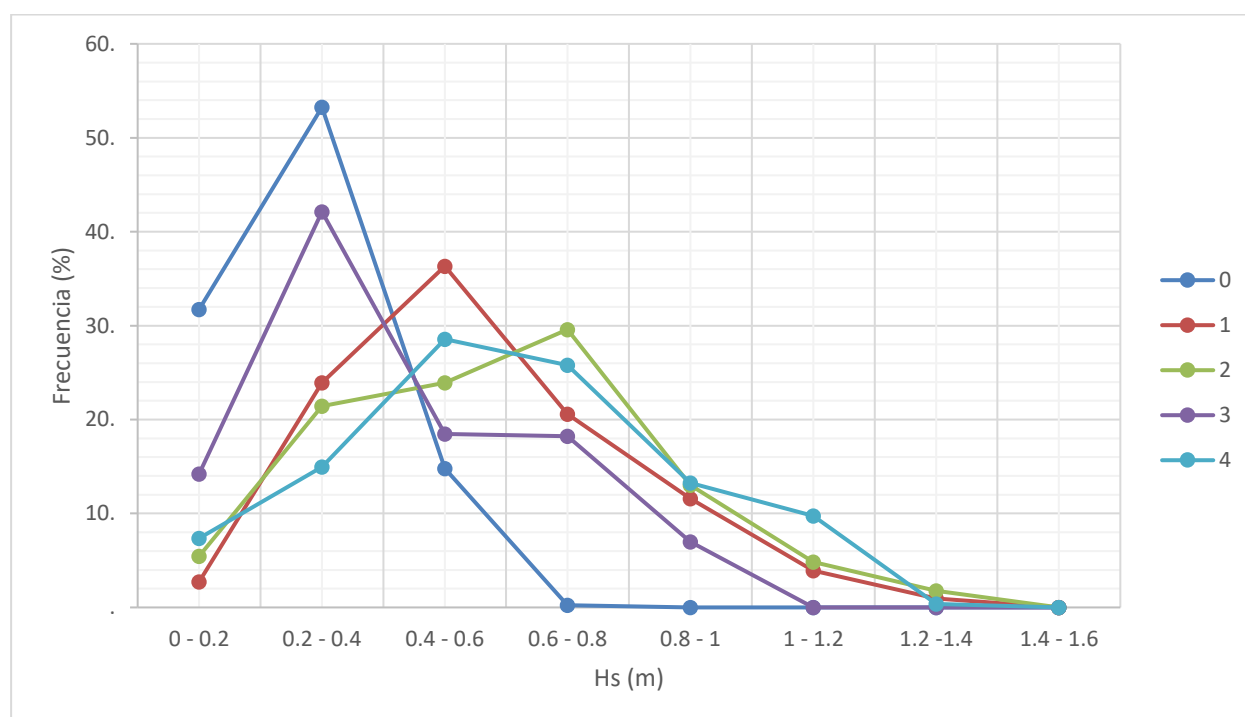


Figura 6-42. Diagrama comparativo de Hs y frecuencias medias

Conforme aumenta la intensidad de los forzamientos, el diagrama Hs – Frecuencia va disminuyendo su pico y avanzando hacia la derecha, alcanzando así alturas significantes de mayor magnitud. Es por ello que como se observa en la figura 6-42, el forzamiento de menor intensidad sin contar el escenario 0, es el correspondiente al escenario 3, que es aquel que traspasaba el umbral por poco tiempo y con valores muy cercanos a 3 metros. En cambio, el temporal de mayor magnitud es el del escenario 4, seguido del escenario 2 que son los que tiene un menor pico. En la figura 6-44 se puede ver cómo quedan ordenados los escenarios según la intensidad del forzamiento al que han sido sometidos.

Forzamientos más intensos generan mayor influencia de energía, especialmente en el punto E, como se puede comprobar en las siguientes figuras y en la tabla 6-22. El punto D suele ser el punto donde hay menor influencia de energía (Figura 6-44) lo que puede explicarse por la barra existente justo frente a dicho punto, que amortigua el oleaje (Figura 6-43).



Figura 6-43. Vectores RMA. Plano general (Cada color corresponde a un escenario, ver leyenda)

Las direcciones de la RMA en el punto C parecen condicionadas por la abertura que queda entre las barras que rodean dicho punto de control. Sin embargo, el patrón de los vectores en los puntos C, D y E parece repetirse con pequeñas variaciones en la dirección. Por tanto, estos puntos se ven afectados aproximadamente de la misma manera en cada uno de los diferentes escenarios.

En el punto de control B todos los vectores apuntan en la misma dirección, por lo que puede decirse que el transporte de sedimentos en ese punto sigue la dirección Noroeste. Tanto en ese punto como en el punto A, la línea de costa parece haber alcanzado el equilibrio ya que en todos los escenarios ésta se presenta perpendicular al vector de la RMA. (Figura 6-43)

Tabla 6-22. Tabla comparativa RMA según escenarios

Escenario	RMA	Puntos de control				
		A	B	C	D	E
0	R (N/s)	139.77	126.99	118.26	110.8	156.7
	γ (°)	59.41	64.48	65.25	68.17	68.64
1	R (N/s)	581.37	505.83	548.51	594.76	1113.99
	γ (°)	87.59	79.66	66.46	64.71	61.54
2	R (N/s)	740.42	661.24	682.57	682.65	1307.24
	γ (°)	73.69	78.99	75.03	73.84	72.44
3	R (N/s)	480.21	413.21	418.44	372.87	707.33
	γ (°)	64.73	79.59	84.95	86.21	87.51
4	R (N/s)	897.62	767.87	781.18	721.73	1386.61
	γ (°)	66.89	80.41	85.61	86.69	87.46

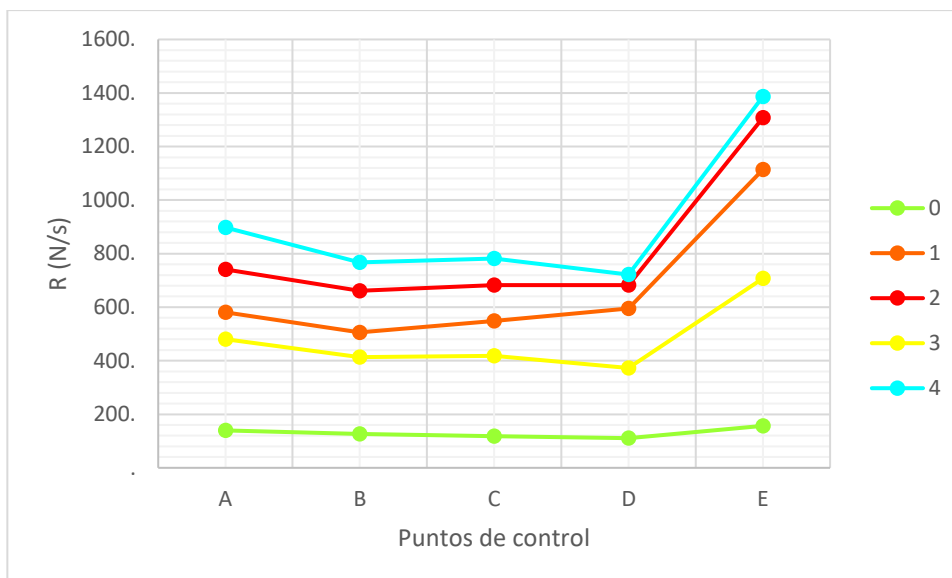


Figura 6-44. Comparación de la RMA de cada escenario según P.C

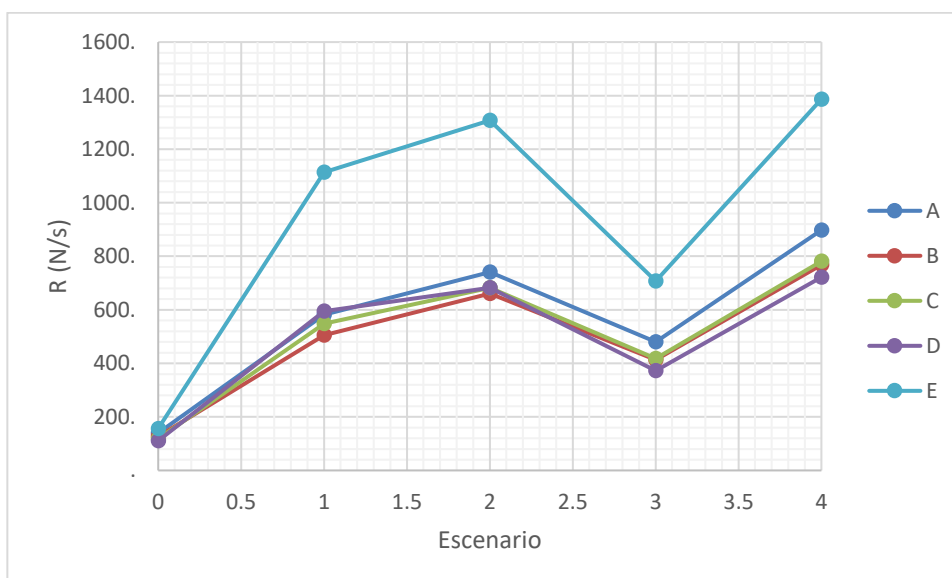


Figura 6-45. Comparación de la RMA de cada P.C según escenario

6.2. Análisis del transporte de sedimentos

Para el análisis del transporte de sedimentos se han tomado 5 perfiles perpendiculares a la costa y se ha realizado el cálculo mediante la fórmula del CERC (Coastal Engineering Research Center) para los distintos escenarios ya presentados.

Con la ayuda de la herramienta Global Mapper se ha generado una malla de elevaciones cargando los datos del terreno en el programa y se han obtenido las coordenadas xyz de los perfiles de la figura 6-46.



Figura 6-46. Perfiles perpendiculares a la costa

La fórmula del CERC es una fórmula experimental que relaciona el flujo longitudinal de energía con el transporte de sedimentos.

$$Q_L = \frac{\rho K \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma} (\rho_s - \rho) (1 - p)} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad (14)$$

donde,

- H_b : altura de ola en rotura
- α_b : ángulo de oleaje en rotura
- ρ : densidad del agua de mar, $\rho = 1025 \text{ Kg/m}^3$
- ρ_s : densidad de las partículas sólidas, $\rho = 2,65 \text{ T/m}^3 = 2650 \text{ kg/m}^3$
- p : porosidad del material, $p = 40 \%$ generalmente
- γ : índice de rotura
- K : constante cuyo valor depende del tamaño del sedimento (Valle et al., 1993)

$$K = 1,6e^{-2,5D_{50}} \quad (15)$$

siendo D_{50} el diámetro en mm.

6.2.1 Ejemplo de procedimiento para el escenario 0

Para obtener el índice de rotura se ha creado una rutina en Matlab que carga los datos de altura significativa propagados y los interpola en las coordenadas x e y de los perfiles, posteriormente compara el perfil de H_s correspondiente al instante en el que se da H_s máxima con el calado multiplicado por varios índices de rotura

cercanos a 0,5. Una vez representada la grafica (Figura 6-47) se seleccionará el punto de intersección entre el perfil de Hs y el del calado por la gamma que corresponda.

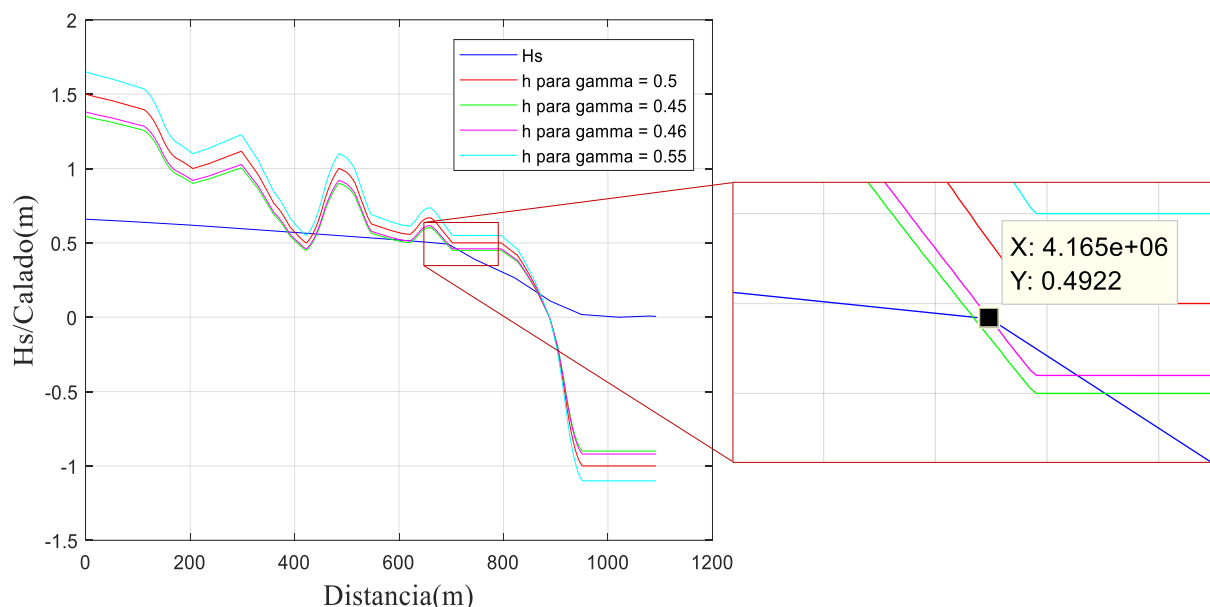


Figura 6-47. Diagrama comparativo de índices de rotura (Escenario 0, perfil 1)

En este caso se puede comprobar que el gamma que mejor se ajusta es $\gamma = 0,46$, correspondiente a la línea magenta (Figura 6-47) y que la altura en el punto de rotura es (altura de rotura) $H_b = 0,4922$ metros.

El ángulo de rotura se obtiene mediante las componentes X e Y de la altura significativa en el punto de rotura, $\alpha_b = 44,2^\circ$ en este caso (Figura 6-48).

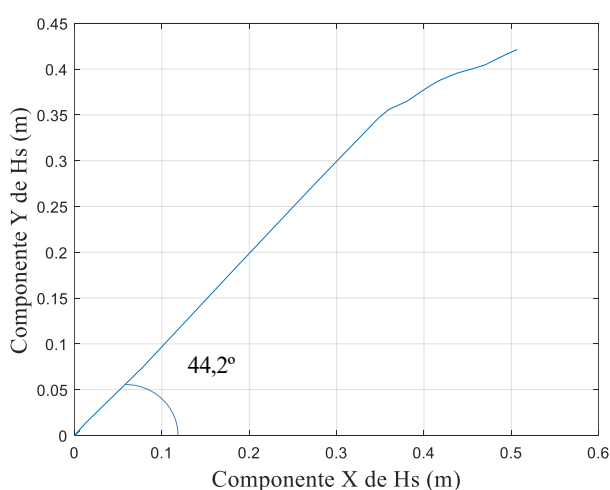


Figura 6-48. Ángulo de rotura

El proceso de obtención de los datos necesarios para el cálculo del transporte de sedimentos mediante la fórmula del CERC se repetirá para todos los perfiles y escenarios, por ello no se considera necesario repetir la explicación anterior.

6.2.2 Tamaño de sedimentos y validación de resultados

El valor de D_{50} se ha obtenido del “Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir.” elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). En este estudio se realizaron 10 muestras en el litoral español y una 1 muestra en los bajos frente a Isla Canela.

La tabla 6-23 es un extracto de los valores que interesan para el presente cálculo de la tabla de resultados de dichas muestras.

Tabla 6-23. Muestras de sedimentos

Playa	D50 (mm)
Canela (frente desembocadura)	0.5
Canela	0.42
Canela (bajos)	0.35

Los perfiles 1 y 2 corresponde a la zona de Canela frente a la desembocadura y los perfiles 3, 4 y 5 a Canela.

De este mismo estudio elaborado por el MAGRAMA se han tomado los valores de transporte longitudinal medio de sedimentos para poder comparar los resultados y así validar los datos obtenidos. A continuación se muestra un listado con dichos valores (con valor positivo en sentido hacia el este) en $m^3/año$, para poder comparar resultados se han pasado estos datos a m^3/s :

- Costa portuguesa: $50/100.000 m^3/año$ o $0,0016/0,0032 m^3/s$
- Parte portuguesa frente a la desembocadura: $- 30/50.000 m^3/año$ o $- 0,00095/0,0016 m^3/s$
- Parte española frente a la desembocadura: $50/75.000 m^3/año$ o $0,0016/0,0024 m^3/s$
- Bajos en el centro de Isla Canela: $25/50.000 m^3/año$ o $0,00079/0,0016 m^3/s$
- Bajos al este de Isla Canela: $250/300.000 m^3/año$ o $0,0079/0,0095 m^3/s$
- Playa Canela: $10/20.000 m^3/año$ o $0,0000317/0,00006335 m^3/s$

Para realizar la validación de los resultados se ha calculado el transporte longitudinal medio en cada uno de los perfiles para el escenario 0.

Tabla 6-24. Transporte longitudinal medio para el escenario 0

	Escenario 0				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
QL medio (m^3/s)	0.000775	0.0008	0.0000232	0.00022	0.000104
QL medio ($m^3/año$)	24440.4	25228.8	731.6352	6937.92	3279.744

Cabe recordar que en este trabajo no se está teniendo en cuenta el aporte de sedimentos del río y que se está calculando el transporte anual a partir de los datos obtenido en una semana en la que no se produce ninguna tormenta. Es decir, sería como considerar que durante todo el año se está repitiendo un escenario en el que no se produce ningunn temporal, cosa que no ocurre en realidad. Por ambas razones las tasas de transporte longitudinal

de sedimentos son menores a las calculadas en el estudio realizado por el Ministerio, donde se tienen en cuenta estos factores.

Dicho esto, para validar los calculos se ha comprobado si los ordenes de magnitud obtenidos son coherentes. En primer lugar la zona a la que pertenecen los perfiles 1 y 2 tiene un transporte longitudinal medio de sedimentos de 50/75.000 m³/año y como se puede comprobar en la tabla 6-24, los datos obtenidos están en torno a 25.000 m³/año, por tanto, son del mismo orden de magnitud.

En cuanto a los demás perfiles, estos pertenecen a Playa Canela por lo que los resultados deberían ser cercanos a 10/20.000 m³/año según el estudio del Ministerio. El valor obtenido en el perfil 4 es de aproximadamente 7.000 m³/año, mientras que en el perfil 5 es de poco más de 3.000 m³/año, esto puede explicarse por la barra existente frente a ambos perfiles (Figura 6-46). Esta barra que emerge con la marea baja está adherida a la costa cerca del perfil 5 y produce una amortiguación del oleaje que la protege de la erosión. El perfil 3 es conflictivo por la misma razón. Se ha obtenido un transporte longitudinal de 731,6 m³/año en dicho perfil y es que es en este punto donde se adhieren y acumulan las barras de poniente.

6.2.3 Resultados

Una vez comprobada la coherencia de los datos se ha procedido al calculo del transporte longitudinal de sedimentos máximo generado en cada perfil por los distintos forzamientos. De este modo se pretende comparar el máximo poder de arrastre de sedimentos de cada escenario.

Tabla 6-25. Transporte longitudinal máximo de sedimentos

Escenarios	QL máximo (m ³ /s)				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
0	0.0231	0.0158	0.0296	0.0227	0.0223
1	0.0586	0.0382	0.0754	0.0941	0.173
2	0.0515	0.0477	0.061	0.1049	0.1381
3	0.0511	0.034	0.0638	0.0527	0.0704
4	0.1028	0.0849	0.1256	0.1025	0.1125

En línea con el orden que se estableció en el apartado de la RMA según la energía (4, 2, 1, 3, 0) el poder de transporte de sedimentos es proporcional a la intensidad de cada escenario, registrándose los máximos en el escenario 4, seguido del 2, el 1, el 3 y por último el 0 (Tabla 6-25). El transporte se produce en dirección Este lo que provoca la acumulación de arena contra el dique del río Carreras y la erosión frente a la desembocadura, además del movimiento de las barras en el mismo sentido aumentando su adhesión a la costa.

A continuación, se ha calculado el transporte total de sedimentos producido por cada forzamiento en cada uno de los perfiles de control (Tabla 6-26). Estos valores son parecidos a los recogidos en el estudio realizado por el Ministerio “Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir.”.

Tabla 6-26. Transporte longitudinal total de sedimentos.

Escenarios	QL total (m ³ /s)				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
0	0.131	0.1354	0.0039	0.0367	0.0176
1	0.1088	0.0819	0.4212	-0.8202	0.4436
2	-0.2407	0.555	-0.6651	0.2104	-0.4933
3	0.203	-0.2174	-0.310	-0.1647	-0.1027
4	0.0976	0.0867	0.1192	-0.1911	-0.6522

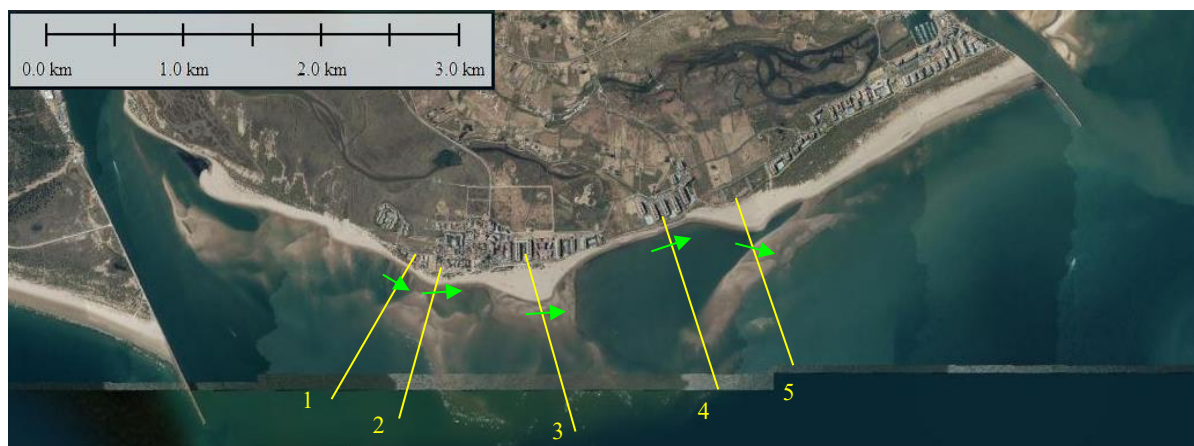


Figura 6-49. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 0)

Nota: los vectores únicamente muestran la dirección de oleaje, al Este en verde y al Oeste en rojo.

En el escenario 0 (Figura 6-49) los sedimentos son arrastrados hacia el Este, erosionando la parte más cercana a la desembocadura y acumulándose contra el dique del río Carreras, al Este. Recordando lo que se dijo en el apartado “2. Zona de estudio”, el clima marítimo está dominado por olas de energía moderada procedentes del O-SO (71% de ocurrencia) y del SE (23% de ocurrencia). Viendo estos porcentajes y los datos obtenidos para una semana sin temporales se puede suponer que esta es la dirección de transporte de sedimentos más frecuente.

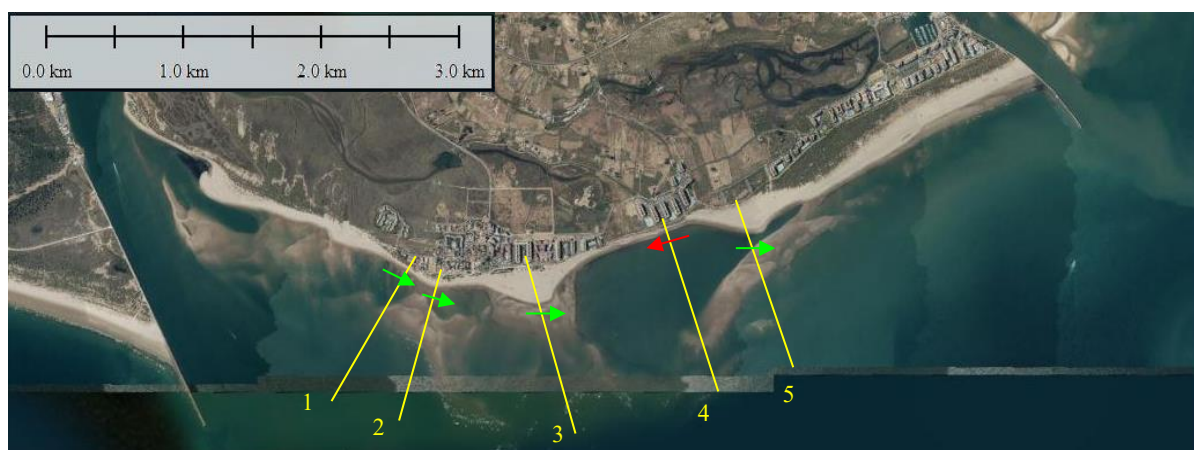


Figura 6-50. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 1)

En el escenario 1 la dirección sigue siendo la misma excepto en el perfil 4, donde la tasa de transporte es negativa debido al predominio del oleaje que incide en dirección Oeste. En la figura 6-51 se puede observar como en uno de los instantes simulados los vectores de dirección del oleaje convergen hacia el tómbolo donde estaría el perfil 3. Esta distribución del sedimento provoca la acumulación en dicho tómbolo.

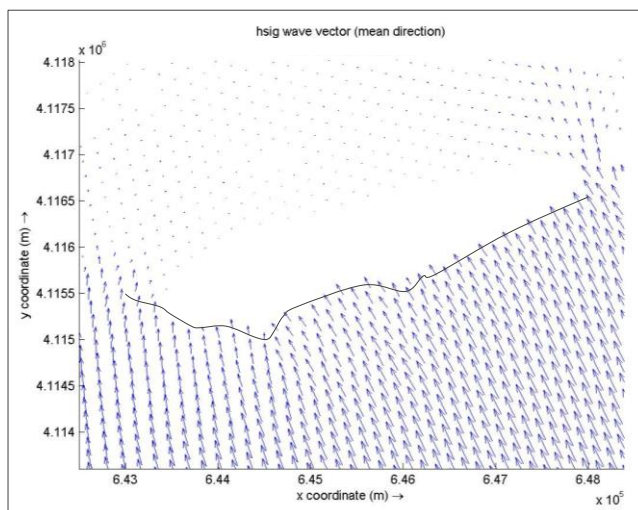


Figura 6-51. Vectores de dirección de oleaje (Escenario 1)

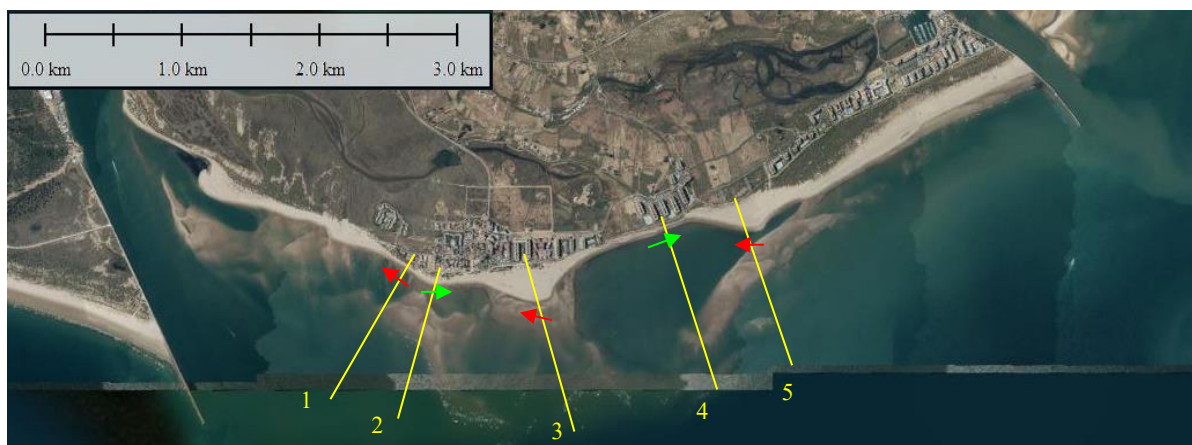


Figura 6-52. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 2)

De la misma manera que en el caso anterior, las barras y los tómbolos provocan cambios de dirección en el oleaje. En la figura 6-52 se puede ver como en la curva existente entre los perfiles 1 y 2 el oleaje diverge, arrastrando el sedimento hacia la desembocadura en el perfil 1 y hacia el tómbolo en el perfil 2. Entre 2 y 3 el sedimento converge en el tómbolo, al igual que ocurre entre 4 y 5.

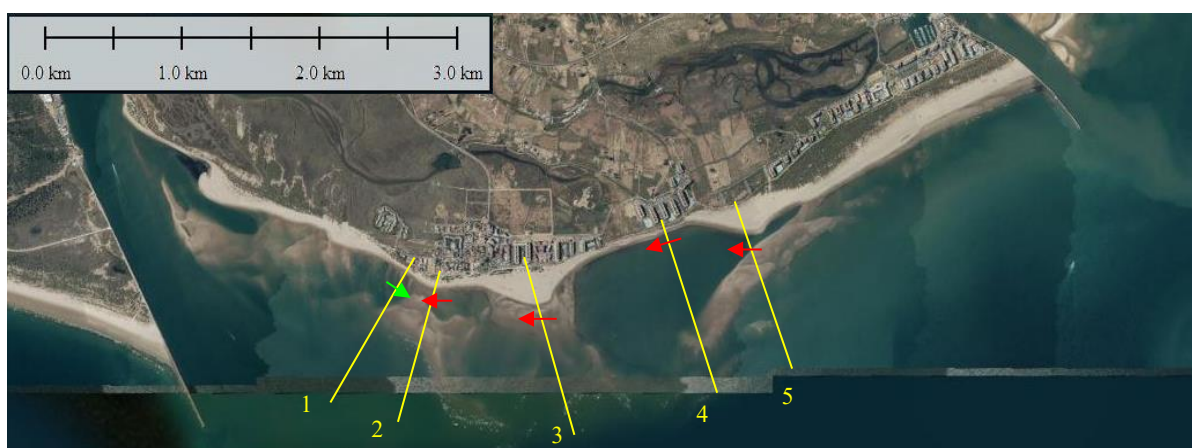


Figura 6-53. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 3)

En el escenario 3 el transporte de sedimentos se produce en dirección Oeste en todos los perfiles excepto en el perfil 1, donde el transporte apunta de nuevo hacia el tómbolo (Figura 6-53). En la figura 6-54 se observa como la mayoría de los vectores apuntan hacia el Oeste, sin embargo, vuelven a converger en el tómbolo por lo que los vectores cercanos al perfil 1 empiezan a virar hacia el Este.

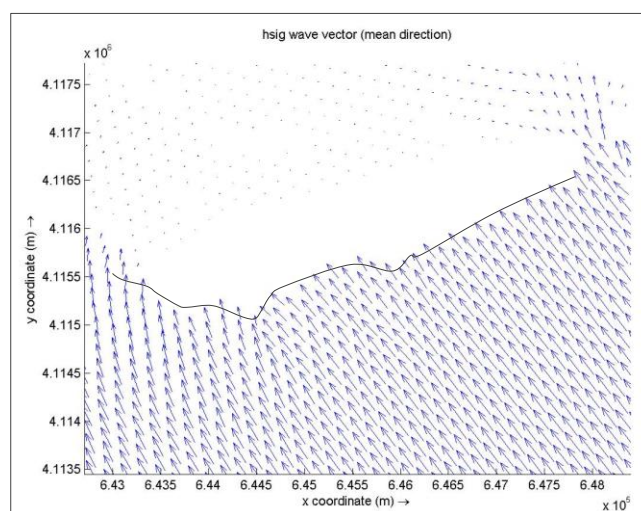


Figura 6-54. Vectores de dirección de oleaje (Escenario 3)

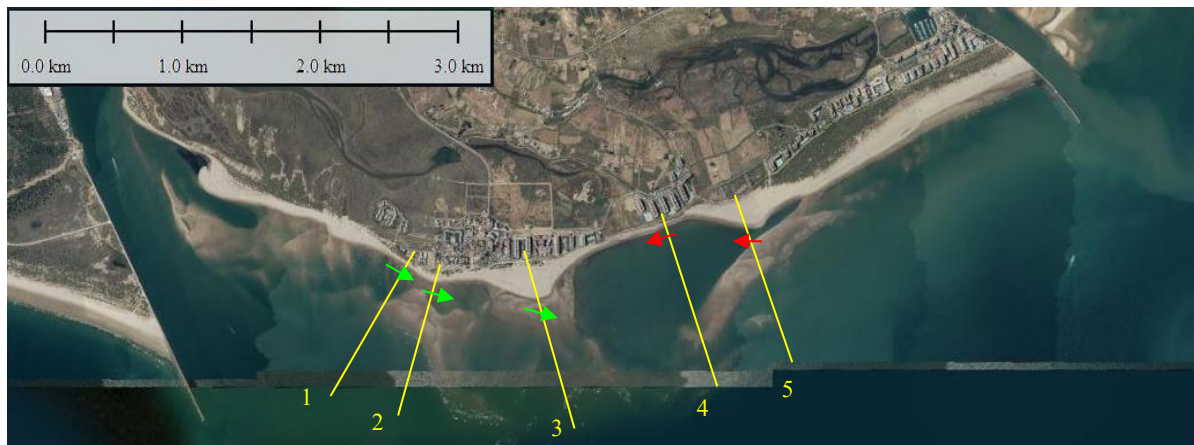


Figura 6-55. Dirección del transporte longitudinal de sedimentos (Escenario 4)

En este último escenario se ha obtenido un transporte de sedimentos que tiende a acumularse en el tómbolo del perfil 3 (Figura 6-55). Este parece ser el punto de acumulación más frecuente de la playa, así como las zonas cercanas a la desembocadura y la del perfil 4 son las de erosión y las que proveen de sedimento a dicho tómbolo.

En resumen, cada temporal genera una distribución de sedimentos con direcciones distintas y tasas que son mayores cuanto mayor es la energía del temporal. Estas direcciones que suelen ser en sentido Este cuando la playa está en calma, toman diferentes direcciones no solo debido a los temporales sino también por la influencia que las barras tienen sobre este oleaje, haciendo que los vectores de transporte de sedimentos converjan o diverjan en determinados puntos dependiendo del caso. Lo que todos los casos parecen tener en común es que los sedimentos tienden a acumularse en el tómbolo del perfil 3 y a veces en el perfil 5. Como se ha dicho los perfiles 1 y 2 sufren erosión y suelen alimentar al perfil 3. En cuanto al perfil 4, que recordando lo que se dijo en el apartado “2.2 Situación actual” es uno de los puntos de mayor riesgo, y es que este punto alimenta tanto al perfil 3 como al perfil 5.

7 CONCLUSIONES

Como se ha visto a lo largo de este documento, la costa de Isla Canela ha sufrido a lo largo de las últimas décadas un proceso de erosión grave a raíz de la construcción del encauzamiento del río Guadiana. Esto sumado a la disminución de aporte de sedimentos del río debido a los numerosos embalses construidos y a las actividades urbanizadoras, han llevado a la playa de Isla Canela y a las urbanizaciones consolidadas frente a ella a una situación de alto riesgo.

Las barras que componían el Banco do O'bril antes de la construcción de los diques en 1972 y 1974 se encuentran en la actualidad frente a la costa de Isla Canela. Estas barras llevan desde su formación desplazándose hacia el este, llegando a adherirse a la playa en varios puntos.

7.1. Clima marítimo

A partir de los datos procedentes de los puntos SIMAR cercanos a la zona de estudio y al conjunto de datos REDMAR se ha elaborado el clima marítimo de la costa de Isla Canela. El rango de alturas significantes de ola oscila entre 0 y 4 metros, siendo las más frecuentes entre 0 y 0,5 metros en un 55,46% de los casos. Los periodos pico oscilan entre 1 y 18 segundos, dándose los más frecuentes, entre 4 y 7 segundos, en un 44,15% de los casos. En cuanto a la dirección de procedencia del oleaje, las más frecuentes son OSO y O (56,72%) y SE (15,12%).

Para el **régimen medio anual** del oleaje se ha obtenido que la altura cuya probabilidad de no excedencia es del 56% es 0,4 metros, y la altura cuya probabilidad de no excedencia es del 88% es 1 metro.

Para el **régimen extremal** se han tomado las alturas superiores a 3 metros y se han calculado las funciones de densidad y distribución tipo Weibull. Se ha obtenido una probabilidad de no excedencia del 27,26% para una altura de 3 metros, otra de 45,84% para 3,4 metros y una probabilidad de no excedencia del 93% para 4,2 metros.

El rango de velocidades de viento oscila entre 0 y 16 m/s, siendo más frecuente entre los 3 y 7 m/s en un 58,72% de los casos. Las direcciones de procedencia más frecuentes son NO (19,9%) y SO (17,5%)

7.2. Modelo numérico

Tras haber analizado tanto los antecedentes como la situación actual y el clima marítimo de la costa de Isla Canela, se ha generado un modelo de la zona de estudio mediante el software Delft3D, el cual permite analizar la influencia de agentes como el oleaje, el viento y las mareas sobre la batimetría y la costa. Se han seleccionado 5 forzamientos de distinta intensidad que han sido simulados por dicho programa y se han comparado y analizado los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios.

Dicho modelo se ha validado con coeficientes $R=0,82$ y $S=0,82$ para altura significativa, $R=0,74$ y $S=0,54$ para el periodo pico y $R=0,95$ y $S=0,95$ para la dirección de oleaje. Para llegar a estos datos se ha calibrado el parámetro de Collins hasta ajustarlo al valor de 0,1.

7.3. Análisis de escenarios

Para el análisis del **régimen medio** se ha calculado el histograma de frecuencias altimétricas y las funciones de densidad y distribución de Weibull, además de la resultante media anual (RMA) en cada uno de los puntos de control establecidos para cada escenario.

Los datos obtenidos han permitido ordenar los escenarios de mayor a menor energía producida, siendo el orden 4, 2, 1, 3 y 0. Comparando el escenario 0 con el 4, se ve como en este último se produce un aumento del rango de altura significativa de ola pasando de ser de 0 a 0,8 metros para el escenario 0 a ser de 0 a 1,4 metros para el

escenario 0. En el escenario 0, escenario en el cual no se produce ningún temporal, la altura significativa más frecuente se encuentra entre 0,2 y 0,4 (53,25%), mientras que para el escenario 4 la altura más frecuente se encuentra entre 0,4 y 0,8 (54,35%).

En cuanto a la **resultante media anual** de la costa, ésta pasa a ser aproximadamente 6 veces mayor para el escenario 4. Todos los escenarios tienen en común que los puntos que sufren mayor influencia de energía son los puntos más extremos y en todos ellos hay una tendencia a virar hacia el Este. Ver figura 6-43 (pág. 110).

Para el análisis del **transporte longitudinal de sedimentos** se ha utilizado la fórmula del **CERC** en 5 perfiles perpendiculares a la costa. En línea con el orden establecido anteriormente para los escenarios, el transporte longitudinal de sedimentos será mayor cuanto mayor sea la energía del temporal. En general la costa sufre un transporte en dirección Este, sin embargo, esta dirección puede variar según la dirección del oleaje durante los temporales, así como por la influencia de las barras en la dirección del mismo. Aunque esta dirección cambie, tras analizar los diferentes escenarios, se llega a la conclusión de que hay dos puntos principales de acumulación de sedimentos, el tómbolo y el hemitómbolo, en el primer caso debido a la barra adherida a ese punto y en el segundo debido a que el sedimento se está acumulando contra el dique del río Carreras. La zona más cercana a la desembocadura sufre erosión y el arrastre de sedimentos en dirección al tómbolo y alimentándolo. El tramo de playa comprendido entre el tómbolo y el hemitómbolo está considerada como zona de alto riesgo, debido a la poca anchura de la playa en ese punto y a la cercanía de las urbanizaciones. Este punto sufre además erosión y el transporte de sedimentos en ambos sentidos, siendo fuente de sedimento tanto para el tómbolo como para el hemitómbolo. (Figura 7-1)



Figura 7-1. Puntos de referencia de la playa.

7.4. Alegaciones a las actuaciones futuras

Cabe recordar las actuaciones futuras propuestas por el Ministerio para discutir las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas frente a los resultados obtenidos.

- **Alternativa 0:** alternativa de no actuación.
- **Alternativa 1:** movimiento de arena de las zonas acumulativas hacia los tramos erosionados (unos 900 m) y restituir así la costa de 2004.
- **Alternativa 2:** la protección del terreno consolidado frente a la zona erosionada cercana a las urbanizaciones en riesgo mediante un dique o un revestimiento longitudinal en los 900 m entre el tómbolo y el hemitómbolo con el fin de que resista los embates del mar durante los temporales y con una vida útil lo suficientemente larga como para que se forme una playa frente a la obra.
- **Alternativa 3:** construcción de dos espigones cortos y la recarga de arena mediante el movimiento de arena ya mencionado anteriormente para restituir a línea de costa de 2004.

En vista de los datos obtenidos está claro que la “Alternativa 0” no es una opción. Es cierto que las barras servirán como alimento de la playa durante un determinado tiempo, pero la erosión se seguirá produciendo si no se toma

ninguna medida de protección. En cuanto a la “Alternativa 1”, restituir la costa de 2004 (Figura 7-2) sería como volver al inicio del proceso erosivo que ha sufrido la playa. Se volvería a disponer de una anchura adecuada en todos los puntos de la costa, pero al igual que con la “Alternativa 0”, si no se realizan obras de protección la playa volverá a sufrir un proceso erosivo parecido al ya acaecido.



Figura 7-2, Restitución de la línea de costa de 2004.

Una suerte de “Alternativa 2” se llevó a cabo entre los años 1996 y 2000 con la construcción de una protección de escollera en la zona de riesgo. Con el paso del tiempo se comprobó que no llegó a formarse ninguna playa frente a ella (Figura 7-3) y que lo único que se consiguió con dicha protección fue defender esa zona para poder seguir construyendo junto al agua y trasladar los problemas de erosión a otros puntos de la playa.



Figura 7-3. A la izquierda playa completamente erosionada y a la derecha escollera destruida. (AVECA)

La “Alternativa 3” es, por tanto, la más aconsejable de las propuestas por el Ministerio. Sin embargo, cabe hacer algunas consideraciones. Esta propuesta consiste en la construcción de dos espigones cortos y blandos además del aporte de arena para restituir la línea de costa de 2004. Dejando de lado la vulnerabilidad de dichos espigones frente al vandalismo y la percepción social de poca resistencia, es posible que esta solución genere nuevos problemas de erosión local.

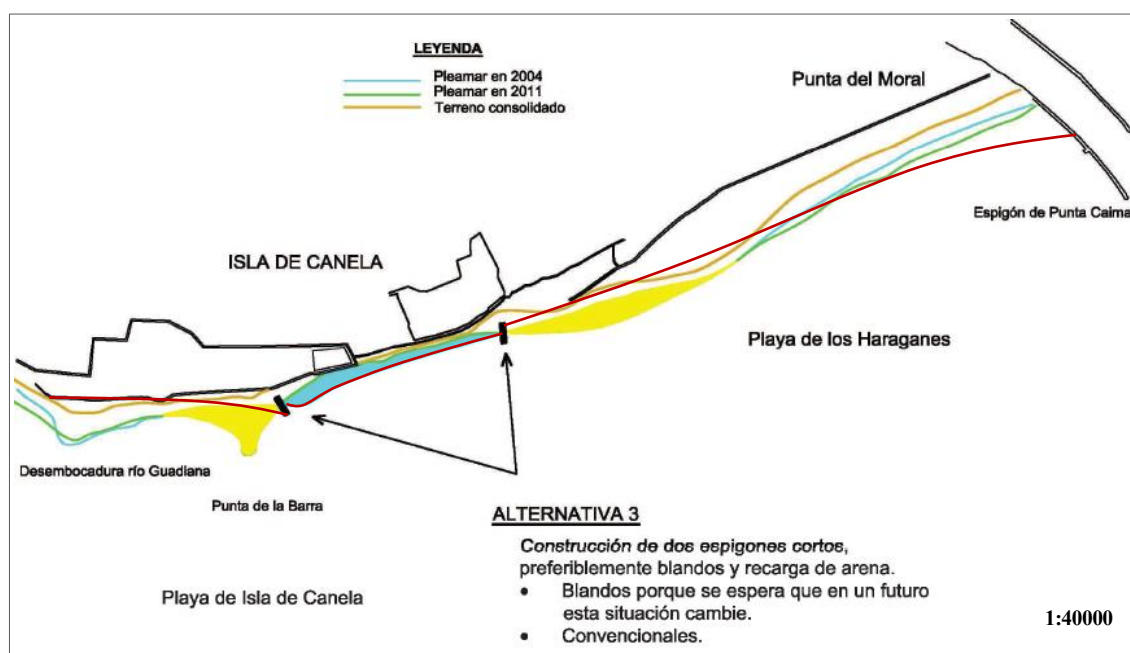


Figura 7-4. Alternativa 3. En rojo hipótesis de posible línea de costa a largo plazo como consecuencia de las obras.

Los dos diques se colocarían después del tómbolo y antes del hemitómbolo (Figura 7-4), y la arena de estos se utilizaría para rellenar la zona encerrada por ambos diques, es decir, la zona de mayor riesgo de la playa. De esa manera, se restituiría la línea de costa de 2004 y permitiría que la arena entre ambos espigones no fuera erosionada y transportada hacia los laterales, garantizando así su permanencia en la zona donde se va a producir la erosión más relevante en los próximos años. Estas obras proporcionarían una protección permanente a dicho tramo, permitiendo disponer de una superficie permanente de playa.

Aunque esta obra interrumpiese parte del transporte de sedimentos hacia Punta del Moral, en ese sentido, el impacto de esta obra sobre dicha parte de la playa sería reducido, dado que el mayor aporte de sedimentos que recibe Punta del Moral procede de la barra que se encuentra frente a ella y quedaría retenido por el dique del río Carreras.

El mayor impacto de esta obra se daría en los laterales externos de los espigones, sobre todo en el extremo occidental de la playa, donde los procesos erosivos se verían incrementados en los tramos más cercano a los espigones.

Pensando en las consecuencias de esta alternativa a largo plazo, por la protección de un solo tramo podría verse acelerado el proceso erosivo hasta hacer desaparecer gran parte de la playa en los laterales de la zona protegida. Tanto el extremo occidental como el oriental podrían verse afectados por un proceso similar al ocurrido junto a los diques de Portugal y el río Carreras, pero a menor escala. Es decir, los puntos de la playa que se encuentren más alejado de los nuevos espigones se irán erosionando y el sedimento será transportado contra el espigón más cercano a la desembocadura y contra el dique del río Carreras. Cuando el espigón no pudiese acumular más arena se llegaría a una situación en la que la poca extensión de playa que hubiese quedado retenida contra el mismo, seguiría erosionándose pudiendo llegar a desaparecer (Figura 7-4).

Lo mismo ocurriría en el extremo oriental, conocida como playa de los Haraganes, se produciría erosión local junto al espigón, desde la escollera longitudinal de protección hasta la playa de Punta del Moral y el sedimento sería transportado como es general, al dique de Punta Caimán donde se va produciendo una colmatación progresiva (Figura 7-4). A largo plazo le afectaría de forma negativa la erosión generada por los espigones, sobre todo si se diera el caso de que, tras la total adición de la barra a ese tramo de playa, el dique junto a la desembocadura del río Carreras quedase completamente colmatado.

A estos efectos a ambos lados de la obra habría que añadirle la extracción de arena que se planea realizar para poder rellenar la zona entre espigones y así restituir la línea de costa de 2004.

En vista de los efectos erosivos que podría producirse a raíz de la construcción de los espigones, sería recomendable realizar un análisis detallado de la evolución de la costa que cabe esperar y en función de los resultados, proponer una serie de soluciones encaminadas a proteger la playa de dicha erosión.

Algunas soluciones que podrían estudiarse serían:

- La extracción del material de aporte para la zona enmarcada por los espigones de una zona donde el daño medioambiental fuera menos severo, ya que esta extracción aumenta la vulnerabilidad de la costa frente a los procesos erosivos.
- La construcción de un tercer espigón entre el espigón de levante y el dique de Punta Caimán o al Oeste del espigón frente a la desembocadura del río Guadiana que generase otro punto de acumulación.
- La construcción de diques exentos que protegiesen la playa y mitigando la erosión y la influencia del oleaje en los puntos de mayor influencia energética.

APÉNDICE A: CONJUNTO DE DATOS SIMAR

A.1. Procedencia y obtención del conjunto de datos

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son por tanto datos sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

A.2. Subconjunto SIMAR-44

El conjunto SIMAR-44 es un reanálisis de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación de atmósfera y oleaje en la cuenca mediterránea fueron realizadas por Puertos del Estado en el marco del Proyecto Europeo HIPOCAS. Los datos de oleaje en el dominio atlántico y en el Estrecho de Gibraltar proceden de dos simulaciones análogas de viento y oleaje, una realizada por Puertos del Estado de forma independiente, y la otra llevada a cabo por el Instituto Mediterráneo de Estudios avanzados (IMEDEA) en el marco del proyecto VANIMEDAT-II.

Seguidamente se da una breve descripción del modo en que se ha generado cada uno de los agentes simulados.

A.2.1 Viento

Los datos de viento del Mediterráneo se han obtenido mediante el modelo atmosférico regional REMO forzado por datos del reanálisis global NCEP. Dicho reanálisis asimila datos instrumentales y de satélite. El modelo REMO se ha integrado utilizando una malla de 30' de longitud por 30' de latitud (aprox. 50 Km x 50 Km) con un paso de tiempo de 5 min. Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

Para la obtención de los datos de viento en el Atlántico y Estrecho de Gibraltar se ha utilizado el modelo RCA3.5 alimentado con los datos del reanálisis atmosférico global ERA-40. Estas simulaciones fueron realizadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es) con una resolución de malla de 12' de latitud por 12' de longitud (aproximadamente 20 Km x 20 Km)

Debido a la resolución de las mallas utilizadas en los modelos REMO y RCA3.5 no permite modelar el efecto de accidentes orográficos de extensión inferior a 50Km. Tampoco quedan modelados la influencia en el viento de procesos convectivos de escala local. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral etc. De modo general será más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes de mar.

A.2.2 Oleaje

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WAM. Dicha aplicación es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Los datos se han generado con una cadencia horaria. Se ha realizado descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se ha considerado la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo. Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciado variable con una resolución de 15' de latitud x 15' de longitud (unos 25 Km x 25 Km) para el borde Este de la malla y de 7,5' de latitud x 7,5' de longitud (aproximadamente 12,5 Km

x 12,5 Km) para el resto del área modelada. Por otro lado, para el 'área atlántica se ha utilizado una malla de espaciado variable que cubre todo el Atlántico Norte con una resolución de 30' latitud x 30' longitud para las zonas más alejadas de la Península Ibérica y de Canarias, aumenta a 15' de latitud x 15' de longitud al aproximarse. Para el entorno del Golfo de Cádiz, Estrecho de Gibraltar y del Archipiélago Canario se han anidado a la malla principal mallas secundarias con una resolución que llega a los 5' de longitud x 5' latitud. El modelo WAM utilizado para generar estos datos incluye efectos de refracción y asomeramiento. No obstante, dada la resolución del modelo, se pueden considerar despreciables los efectos del fondo. Por tanto, para uso práctico los datos de oleaje deben de interpretarse siempre como datos en aguas abiertas a profundidades indefinidas.

A.3. Subconjunto WANA

Las series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es). No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelado y consistente con las observaciones realizadas. Es importante tener en cuenta que las series temporales de viento y oleaje del conjunto WANA no son homogéneas, pues los modelos de viento y oleaje se van modificando de modo periódico para introducir mejoras. Estas mejoras han permitido, entre otras cosas, aumentar la resolución espacial y temporal de los datos a partir de los cuales se genera la información del conjunto WANA.

Seguidamente se da una breve descripción de los modelos numéricos utilizados para generar las series de viento y oleaje.

A.3.1 Viento

El modelo atmosférico utilizado para generar los campos de vientos es el HIRLAM, de AEMET. Este es un modelo atmosférico mesoescalar e hidrostático. Los datos de viento facilitados son 10 metros de altura sobre el nivel del mar. Los datos de viento no reproducen efectos geográficos ni procesos temporales de escalas inferiores a la resolución con la que se ha integrado el modelo de atmósfera. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc.

A.3.2 Oleaje

Para generar los campos de oleaje se han utilizado dos modelos: WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo HIRLAM. Ambos son modelos espectrales de tercera generación que resuelven la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. La resolución espacial de los modelos varía dependiendo de la zona, ya que se han desarrollado aplicaciones específicas para diferentes áreas: Atlántico, Mediterráneo, Cantábrico, Cádiz, Canarias y Estrecho de Gibraltar. Se ha realizado una descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se han considerado dos contribuciones posibles para el mar de fondo. Es importante tener en cuenta, que, con independencia de la coordenada asignada a un nodo WANA, los datos de oleaje deben de considerarse, siempre, como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas.

A.3.2.1 Precauciones de uso

El conjunto de datos SIMAR proporciona descripciones adecuadas en casi todas las zonas. No obstante, es necesario tener cautela en las siguientes:

- De forma general se puede decir que los modelos tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo. Se aconseja pues cotejar la magnitud aproximada del temporal con datos instrumentales de la zona.
- En el Sur del Archipiélago Canario pueden no reproducirse bien condiciones procedentes del Suroeste debido a la proximidad del límite del dominio de la malla que utiliza el modelo.

A.3.2.2 Parámetros disponibles

- Velocidad Media del Viento (Promedio horario a 10 m. de altura)
- Dir. Media de Procedencia del Viento(0=N,90=E)
- Altura Significante Espectral
- Periodo Medio Espectral (Momentos 02)
- Periodo de Pico
- Dir. Media de Procedencia de Oleaje (O=N,90= E)
- Altura Significante y Dirección Media de Mar de Viento
- Altura Significante, Periodo Medio y Dirección Media de Mar de Fondo

APÉNDICE B: ECUACIONES WAVE/SWAN

B.1. Ecuación de balance de acción

El modelo de oleaje que utiliza el módulo WAVE de Delft3D es el modelo SWAN.

SWAN permite la generación del oleaje espectral por efecto de la acción del viento y la propagación del mismo oleaje hacia la costa. En este modelo el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de la acción de onda $N(\sigma, \theta)$ en vez de con el espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$, siendo $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$. El espectro puede variar en el tiempo y en el espacio. La evolución del espectro del oleaje es descrita mediante la ecuación de balance de la acción espectral que en coordenadas cartesianas es (Hasselmann et al., 1973):

$$\partial \partial_t(N) + \partial \partial_x(c_x N) + \partial \partial_y(c_y N) + \partial \partial_\sigma(c_\sigma N) + \partial \partial_\theta(c_\theta N) = S_\sigma \quad (B.1)$$

donde, el primer término de la parte izquierda representa la variación local en el tiempo de la densidad de la acción, el segundo y tercer términos representan la variación de $N(\sigma, \theta)$ en las coordenadas geográficas (con velocidades de propagación c_x y c_y), el cuarto término representa la variación debida a desplazamiento de frecuencias por profundidad y corrientes (siendo c_σ la velocidad de propagación en el espacio σ) y el quinto término representa las variaciones debidas a la refracción (por profundidad o por corriente, con velocidad de propagación c_θ en el espacio θ). El término de la derecha representa la contribución de energía dada por la generación de oleaje, la disipación del mismo y las interacciones ola-ola. Este término es representado por la superposición de estos términos fuentes de energía. Los procesos que el modelo SWAN considera son: generación por viento, disipación de oleaje por whitecapping, fricción con el fondo, rotura inducida por variaciones de profundidad, interacciones no lineales entre ola-ola (quadruplets y triads). Además, computa la propagación del oleaje detrás de obstáculos y el set-up debido al oleaje. Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal del oleaje de Whitham (1974).

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (B.2)$$

donde,

- S_{in} es la transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- S_{nl} son las interacciones no lineales entre olas. Considera dos casos, interacciones tríadicas e interacciones entre cuadrupletes (quadruplets y triads).
- $S_{ds,w}$ es la disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping.
- $S_{ds,br}$ es el término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ es la disipación de energía por fricción con el fondo.

B.1.1 Transferencia de energía al oleaje debida al viento, S_{in}

El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar.

La transferencia de la energía del viento a las olas se describe en SWAN con un mecanismo de resonancia (Phillips, 1957) y un mecanismo de realimentación (Miles, 1957). La expresión del término fuente correspondiente a la transmisión de energía debida al viento se encuentra constituida por la suma de un término lineal A más un término de crecimiento exponencial B:

$$\sin(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (B.3)$$

donde, A y B dependen de la frecuencia y la dirección de la onda, de la velocidad y de la dirección del viento. Los efectos de las corrientes se tienen en cuenta en SWAN utilizando la velocidad y dirección del viento local aparentes.

La expresión del término A se debe a Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981), con un filtro para evitar el crecimiento del oleaje a frecuencias menores que la frecuencia de Pierson-Moskowitz (Tolman, 1992) y viene dada por:

$$A = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{2\pi g^3} (U_* \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 \cdot H \quad (B.4)$$

donde θ_w es la dirección del viento y H es el filtro anteriormente referido:

$$H = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right] \quad (B.5)$$

donde, σ_{PM}^* es la frecuencia pico del estado de mar completamente desarrollado y reformulado en términos de la velocidad friccional:

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0,13g}{28U_*} \cdot 2\pi \quad (16)$$

Se usan dos expresiones opcionales para el coeficiente B, el primero se toma de una versión temprana del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 3, grupo WAMDI (1988)). Esta primera versión se debe a Snyder et al. (1981), reescalada en términos de velocidad de fricción U^* por Komen et al. (1984).

La segunda expresión para B en SWAN se toma de la versión más reciente del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 4, Komen et al., (1994)). Esta expresión se debe a Janssen (1991) y explica explícitamente la interacción entre el viento y las olas al considerar los efectos de la capa límite atmosférica y la longitud de rugosidad de la superficie del mar. El conjunto correspondiente de ecuaciones se resuelve (como en el modelo WAM) con el procedimiento iterativo de Mastenbroek et al. (1993).

El crecimiento exponencial (B) está representado por la expresión basada en la teoría de Janssen (1991) queda:

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \cdot \sigma \quad (B.7)$$

siendo:

- c_{ph} : velocidad de fase
- ρ_a : densidad del aire
- ρ_w : densidad del agua
- U^* : velocidad de fricción
- θ : dirección de propagación del oleaje
- θ_w : dirección del viento
- β : es la constante de Miles que se calcula a partir de la altura critica no dimensional λ_h :

$$\beta = \frac{1,2}{\kappa^2} \cdot \lambda_h \cdot \ln^4(\lambda_h) \quad \lambda_h \leq 1 \quad (\text{B.8})$$

$$\lambda_h = \frac{gz_e}{c_{ph}^2} \cdot e^\tau \quad \tau = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (\text{B.9})$$

siendo κ la constante de Von Karman de valor 0,41 y z_e la longitud de rugosidad efectiva. En el caso de que λ_h sea mayor o igual que 1, la constante de Miles β es igual a 0.

Cabe señalar que el modelo SWAN es un modelo computacional que trabaja con la velocidad del viento a 10 metros de altura sobre la superficie U_{10} , mientras que los cálculos utilizan la velocidad de fricción U^* . Para la formulación WAM Cycle 3, la transformación de U_{10} a U^* se obtiene con:

$$U_*^2 = CD \cdot U_{10}^2 \quad (\text{B.10})$$

B.1.2 Interacciones no lineales entre olas, S_{nl}

Se consideran dos casos para las interacciones no lineales entre olas:

Interacción triádica (triad interactions): se trata de la interacción entre tres olas, en la que dos olas interaccionan de manera lineal y le transfieren energía a una tercera. Este tipo de interacción tienen mayor importancia en aguas someras.

Interacción entre cuádrupletes (quadruplets interactions): se trata de interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas que intercambian energía entre ellas si se dan ciertas condiciones. Estas interacciones en cambio, tiene mayor importancia en aguas profundas.

B.1.2.1 Interacciones entre cuádrupletes

Las interacciones entre cuádrupletes onda-onda se calculan con la aproximación de interacción discreta (DIA) según lo propuesto por Hasselman et al. (1985). Su término fuente ligeramente adaptado por Tolman (1993) se ha utilizado en el modelo SWAN. En la Aproximación de Interacción Discreta se consideran dos cuádrupletes de números de onda, ambos con sus frecuencias:

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 &= k_3 + k_4 \\ \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\ \sigma_3 &= \sigma(1 + \lambda) = \sigma^+ \\ \sigma_4 &= \sigma(1 - \lambda) = \sigma^- \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

donde, se asume que $k_1 = k_2$ y λ es una constante fijada como 0,25. Para satisfacer las condiciones de resonancia para el primer cuádruplete, los vectores de números de onda k_3 y k_4 con frecuencias σ_3 y σ_4 forman un ángulo de $\theta_1 = -11,5^\circ$ y $\theta_2 = 33,6^\circ$ con k_1 y k_2 . El segundo cuádruplete es el espejo de este primer cuádruplete por lo que los vectores de número de onda con frecuencias σ_3 y σ_4 forman ángulos espejo de $\theta_1 = 11,5^\circ$ y $\theta_2 = -33,6^\circ$.

Dentro de esta aproximación de interacción discreta, el término fuente $S_{nl4}(\sigma, \theta)$ viene dado por:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (\text{B.12})$$

donde, $S_{nl4}^*(\sigma, \theta)$ se refiere al primer cuádruplete (con $\theta_3 = 11,5^\circ$ y $\theta_4 = -33,6^\circ$) y $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ al segundo

(con $\theta_3 = -11,5^\circ$ y $\theta_4 = 33,6^\circ$).

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}^*(\alpha_1, \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}^*(\alpha_2, \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}^*(\alpha_3, \sigma, \theta) \quad (B.13)$$

con $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = (1+\lambda)$ y $\alpha_3 = (1-\lambda)$.

B.1.2.1 Interacciones triádicas

Eldeberky y Battjes consiguieron en 1995 una aproximación para el cálculo de las interacciones triádicas, el DTA (Discrete Triad Approximation), cuya formulación modifíco Eldeberky en 1996 creando la LTA (Lumped Triad Approximation). Esta es la aproximación que SWAN lleva implementada.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (B.12)$$

con,

$$S_{nl3}^+ = \max \left\{ 0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta)| \{E^2(\sigma/2, \theta) E(\sigma, \theta)\} \right\} \quad (B.13)$$

y

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta) \quad (B.14)$$

siendo, α_{EB} una constante de proporcionalidad calibrable, y las velocidades de ola y grupo c y c_g respectivamente. La bifase se aproxima con:

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0,2}{U_r}\right) \quad (B.15)$$

El número de Ursell se define como:

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (B.16)$$

$$\bar{T} = \frac{2\pi}{\bar{\sigma}}$$

donde,

- H_s es la altura de ola significativa
- d es el calado
- J es el coeficiente de interacción (Madsen y Sorensen, 1993)

B.1.3 Disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping, $S_{ds,w}$

La disipación de la energía de la ola está definida por la suma de los términos de disipación debida al whitecapping $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$, la debida a la fricción con el fondo $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ y la debida a la rotura por la disminución del calado $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$.

La disipación por whitecapping está relacionada con la transferencia de energía del viento a las olas, la cual produce un aumento de la amplitud de las mismas hasta alcanzar un punto que las vuelve inestables y rompen produciéndose el descrestamiento o whitecapping. Esta rotura es fácilmente reconocible por la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

Delft3D permite elegir entre dos modelos, el de Komen et al. (1984) y el de Van der Westhuysen et al. (2007). En este caso se utiliza la segunda formulación que es una adaptación de la expresión de Alves y Banner (2003). Esta última expresión se basa en la aparente relación entre los grupos de ondas y la disipación por el descrestamiento. Esta adaptación de Van der Westhuysen et al. (2007) se debe a que también puede aplicarse a condiciones mixtas de mar y en aguas poco profundas. Esto se hizo eliminando las dependencias de la inclinación espectral media y el número de onda de la expresión original, así como aplicando argumentos de escala del termino fuente para su calibración, lo que condujo a la siguiente expresión para la disipación por descrestamiento:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{\frac{p}{2}} (\tanh(kh))^{\frac{2-p_0}{4}} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta) \quad (B.17)$$

donde, la función de densidad $B(k)$ se denomina saturación espectral y se correlaciona positivamente con la probabilidad de ruptura inducida por el grupo de ondas. Se calcula a partir de las variables de espacio de frecuencia de la siguiente manera:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} c_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta \quad (B.18)$$

siendo, $B_r = 1,75 \times 10^{-3}$ el umbral del nivel de saturación. El coeficiente de proporcionalidad se define como $C'_{ds} = 5,0 \times 10^{-5}$. Cuando $B(k) > B_r$, la ola rompe y el parámetro p será igual al parámetro de calibración p_0 . Para $B(k) \leq B_r$ no se produce rotura, pero se comprobó que era necesaria cierta disipación residual. Esto se consigue estableciendo $p = 0$.

B.1.3 Disipación debida a la rotura por disminución de profundidad, $S_{ds,br}$

Para modelar la disipación de energía en olas aleatorias debida a la rotura por la disminución de la profundidad SWAN utiliza el modelo de Battjes y Janssen (1978):

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (B.19)$$

con:

- D_{tot} : tasa media de disipación de energía por unidad horizontal debida a la rotura.

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\sigma}{2\pi} \right) H_m^2 \quad (B.20)$$

- $E(\sigma, \theta)$: espectro de densidad de energía
- E_{tot} : energía total

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B.21)$$

- α_{EB} : es una constante a introducir en el modelo.

- Q_b : asumiendo la distribución de Rayleigh y que todas las olas rompen por encima de una cierta altura, la fracción de olas que rompen es Q_b :

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (B.22)$$

- $\bar{\sigma}$: frecuencia media:

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B.23)$$

- $H_{2m} = \gamma d$, siendo γ un parámetro de rotura de valor constante que se debe introducir en el modelo.

B.1.3 Disipación de energía por fricción con el fondo, $S_{ds,b}$

Los modelos de fricción de fondo que se utilizan en SWAN son el modelo empírico de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), el modelo de la ley de arrastre de Collins (1972) y el modelo empírico de Madsen et al., (1988).

Las formulaciones de los tres modelos de fricción con el fondo comparten la expresión general:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (B.24)$$

En este estudio se ha utilizado el modelo de Collins (1972). Según Collins el coeficiente de fricción se define:

$$C_{bottom} = C_f g U_{rms} \quad (B.25)$$

donde,

- C_{bottom} : es el coeficiente de fricción, valor que debe ser introducido en el modelo.
- C_f : es una constante cuyo valor es 0,015 (Collins, 1972)
- U_{rms} : es el movimiento orbital del fondo, definido por:

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B.26)$$

APÉNDICE C: PARÁMETROS WAVE

En este apéndice se recogen los distintos parámetros internos del modelo WAVE, así como una breve explicación de cada uno de ellos y como afectan al modelo.

C.1. Módulo WAVE

C.1.1. Descripción (Description)

En este apartado se puede dar nombre al modelo y añadir una breve descripción del modelo que se está realizando. Es muy útil si es necesario realizar más de un modelo, permitiendo llevar un orden.

C.1.2. Hidrodinámica (Hydrodynamics)

Este apartado sirve para especificar si la simulación va a ser exclusivamente usando el módulo WAVE o si se llevara a cabo una simulación conjunta de WAVE y FLOW. En este caso solo se usará el módulo WAVE.

C.1.3 Malla (Grids)

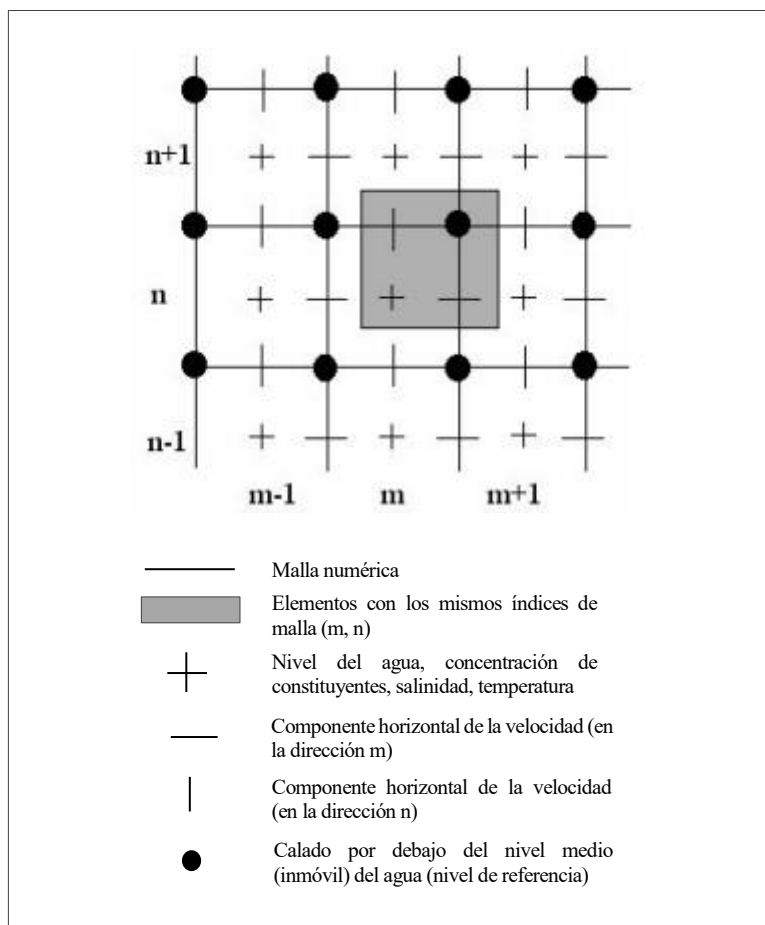


Figura C-0-1. Malla teórica

C.1.3.1 Malla computacional (Computational grid)

Es necesario cargar la malla que se va a emplear en la propagación del oleaje.

C.1.3.2 Malla Batimetría (Bathymetry)

Se carga el archivo de batimetría en formato .dep que corresponde a la malla cargada anteriormente.

C.1.3.3 Resolución espectral (Spectral resolution)

Este apartado se divide en dos partes:

- Espacio direccional (Directional space), donde se especifica el número de partes en que se puede dividir la circunferencia a la hora de considerar las direcciones.
- Espacio frecuencia (Frequency space), aquí hay que especificar la frecuencia más baja y la más alta que se considera para el oleaje. Es decir, los periodos mayores y menores que se tendrán en cuenta en el cálculo del oleaje.

C.1.3.4 Anidamiento (Nesting)

Este apartado es para hacer saber al programa que hay una malla anidada dentro de otra. Como en el presente caso solo se ha definido una malla este apartado no aplica.

C.1.3.5 Hidrodinámica (Hydrodynamics)

El programa necesita saber cómo actuar con los resultados obtenidos del FLOW. De nuevo este apartado no aplica y que ese en este caso solo se está utilizando el módulo WAVE.

C.1.4 Periodo de tiempo (Time frame)

En el grupo de datos referidos al periodo de tiempo, se define la relación entre el eje temporal de la realidad y el de la simulación. El periodo de tiempo en formato [dd mm aaaa hh mm ss] son las fechas que se simulan, es decir, las fechas en las que se llevan a cabo los cálculos. Estas fechas deben coincidir con los tiempos introducidos en el archivo “wavecon”.

C.1.5 Condiciones de contorno (Boundaries)

Existen distintas formas de introducir las condiciones de contorno en el modelo: por dirección, por coordenadas, por celdas, etc.

En este modelo se ha introducido mediante orientación, siendo Suroeste en todos los casos menos en el caso 1 donde se ha introducido la dirección Sur como condición de contorno. Con esta opción el programa interpreta que los datos e oleaje que han sido introducidos entran por los límites de la malla cuyas normales se aproximan más a la orientación definida.

C.1.6 Obstáculos (Obstacles)

Esta opción permite añadir obstáculos al modelo en zonas donde haya muros de contención de escollera, muros sumergidos, etc. Esto permite simular mejor la realidad de la zona de estudio. Se han introducido dos obstáculos correspondientes a los dos diques, el del río Guadiana y el del río Carreras. Los valores que se han utilizado son los mismos utilizados en el PFC “Influencia de las acciones humanas en la hidrodinámica de la bahía de Cádiz” (del Rosal Salido, J., 2013) debido a la similitud con el dique del río Guadalete.

C.1.7 Parámetros físicos (Physical parameters)

Este es uno de los apartados más importantes y son los parámetros que suelen modificarse para la calibración de los modelos numéricos, ya que son los que controlan en mayor medida el correcto funcionamiento del mismo.

C.1.7.1 Constantes (Constants)

Se debe definir el valor de algunas constantes como la gravedad, la densidad del agua de mar, la posición del eje x respecto al norte, el sistema de coordenadas, etc.

Los valores definidos para este caso son:

- Gravedad: 9,81 m/s²
- Densidad del agua de mar: 1025 kg/m³
- Posición del eje x respecto al norte: 90°, lo que significa que el eje x señala hacia el Este.
- Profundidad mínima: 0,05 m
- Sistema de coordenadas: náuticas.
- Fuerzas: tensión por radiación.

C.1.7.2 Procesos (Processes)

Generación (Generation): Se utiliza el modelo de tercera generación. En este tipo de modelos todos los procesos relevantes están representados de forma explícita sin ninguna restricción, además, no se impone ninguna forma definida del espectro. Los modelos de tercera generación ofrecen una gran mejora respecto a los de generaciones anteriores al no utilizar formulaciones paramétricas simples, como las usadas por los modelos de segunda generación. En su lugar utilizan la aproximación de interacción discreta (DIA, Discrete Interaction Approximation) de Hasselman (1985). La característica de la aproximación de interacción discreta es que al contrario que las parametrizaciones de segunda generación que solo tienen un pequeño número de grados de libertad (entre 3 y 5), la DIA tiene tantos grados de libertad como valores ay en el espectro ya discretizado.

Rotura inducida por fondo (Depth induced breaking, B&J model): Este parámetro definido en el apéndice anterior se define mediante dos parámetros: α que se refiere al ratio de disipación y oscila entre 0 (ningún efecto) y 1 (el efecto por disipación es total), y γ , que se define de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{\text{Altura de ola máxima}}{\text{Profundidad}} \quad (\text{C.1})$$

Para este caso se han fijado $\alpha = 1$ y $\gamma = 1,2$.

Interacciones triádicas no lineales (Non-linear triad, LTA): los parámetros que han de definirse son: α , que es el valor del coeficiente de proporcionalidad α_{EB} que se vio en el apéndice A, y β que determina el ratio entre la máxima frecuencia y la frecuencia principal para las cuales las interacciones son calculadas.

Fricción del fondo (Bottom friction): este parámetro es el que más afecta al cálculo numérico de las simulaciones, de modo que es importante conseguir un buen ajuste mediante la calibración de este parámetro. De los tres modelos de fricción disponibles, se ha seleccionado el modelo Collins.

Este valor es necesario calibrarlo.

Difracción (Diffraction): una vez activada esta opción se definen dos valores: el coeficiente de suavizado

(smoothing coeff.) y los pasos de suavizado (smoothing steps). Para este modelo se han definido 0,9 y 900 respectivamente.

Varios (Various): en el apartado de “varios” se pueden activar o desactivar una serie de procesos tales como, el crecimiento de la ola debido al viento (wind growth), cuádrupletes (quadruplets) y descrestamiento (whitecapping). Para este proyecto solo se activa la opción de descrestamiento y se selecciona el modelo de Van der Westhuysen de las dos opciones posibles.

C.1.8 Parámetros numéricos (Numerical parameters)

En este apartado se ha definido la precisión de convergencia que viene definida como el tanto por ciento de puntos húmedos en los que el modelo debe converger, 98% y el número máximo de iteraciones que se deben realizar en cada paso se ha fijado en 15 iteraciones.

Al ejecutar la simulación, el programa empieza a realizar iteraciones para cada instante de tiempo definido. En cada iteración se realizan cuatro barridos (sweep) y al terminar el cuarto de estos barridos la iteración termina con un porcentaje de puntos húmedos en los que el modelo ha convergido (se debe alcanzar el 98% fijado). Posteriormente empezar la siguiente iteración y se vuelve a realizar el mismo proceso. Cada instante de tiempo es simulado hasta alcanzar el número máximo de iteraciones o el porcentaje de puntos húmedos requerido.

Un ejemplo sería:

```
iteration 1; sweep 1
+iteration 1; sweep 2
+iteration 1; sweep 3
+iteration 1; sweep 4
accuracy OK in 0.94 % of wet grid points ( 98.00 % required)
```

```
iteration 2; sweep 1
+iteration 2; sweep 2
+iteration 2; sweep 3
+iteration 2; sweep 4
accuracy OK in 94.13 % of wet grid points ( 98.00 % required)
```

```
iteration 3; sweep 1
+iteration 3; sweep 2
+iteration 3; sweep 3
+iteration 3; sweep 4
accuracy OK in 96.78 % of wet grid points ( 98.00 % required)
```

```
iteration 4; sweep 1
+iteration 4; sweep 2
+iteration 4; sweep 3
```

+iteration 4; sweep 4

accuracy OK in 97.95 % of wet grid points (98.00 % required)

iteration 5; sweep 1

+iteration 5; sweep 2

+iteration 5; sweep 3

+iteration 5; sweep 4

accuracy OK in 98.25 % of wet grid points (98.00 % required)

C.1.9 Curvas de salida (Output curves)

No aplica en este caso. Se ha dejado por defecto.

C.1.10 Parámetros de salida (Output parameters)

El modo computacional seleccionado es el estacionario y se ha especificado que se quieren obtener los resultados en la malla cargada. En este caso no se ha especificado ningún punto de control.

C.1.11 Parámetros adicionales (Additional parameters)

No se ha hecho ninguna modificación en esta sección.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Gonzalez, R., Dias, J.M.A., y Ferreira, Ó., (2001). Recent rapid evolution of the Guadiana Estuary (south western Iberian Peninsula). *Journal of Coastal Research* Special Issue 34, (ICS 2000 New Zealand). ISS N0749-0208. Recuperado de: http://www.academia.edu/16956890/Recent_rapid_evolution_of_the_Guadiana_Estuary_Southern_Portugal_Spain_
- [2] Rodríguez Ramírez, A., Morales González, J.A., Delgado Rodríguez, I., y Cantano Martín, M., (2008). The impact of man on the morphodynamics of the Huelva coast (SW Spain). *Journal of Iberian Geology*. Vol. 34, n. 2, págs. 313-327. ISSN 1698-6180. Recuperado de: <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/8997>
- [3] Europa Press. (28/03/2018) Costas evalúa ya las actuaciones que se van a acometer en las playas tras los temporales. *Europa press*. Recuperado de: <http://www.europapress.es/andalucia/huelva-00354/noticia-costas-evalua-ya-actuaciones-van-acometer-playas-temporales-20180328165056.html>
- [4] Humanes, M., (06/04/2015) Proteger las playas: una necesidad medio ambiental y económica. *Huelva Información*. Recuperado de: https://www.huelvainformacion.es/huelva/Proteger-playas-necesidad-medioambiental-economica_0_905009839.html
- [5] Humanes, M., (06/04/2015) El Gobierno planea dos espigones en Isla Canela para frenar su erosión. *Huelva Información*. Recuperado de: http://www.huelvainformacion.es/huelva/Gobierno-espigones-Isla-Canela-erosion_0_905009841.html
- [6] Trujillo, R., (25/03/2015) Proyecto de estabilización de la playa de Isla Canela. Alegaciones de AVECA al proyecto. *Asociación de vecinos de Isla Canela y Punta del Moral (AVECA)*. Recuperado de: http://aveca.es/index.php?option=com_content&view=article&id=77:2015-03-25-15-15-38&catid=1:noticias&Itemid=6
- [7] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaria de Estado de Medio Ambiente y Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, 2013. *Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir*.
- [8] Morales González, J.A., (2008). *La desembocadura del río Guadiana*. En: Olías Álvarez, M., et al.: *"Geomorfología del Parque Nacional de Doñana"*. 2ª ed. Huelva: Universidad de Huelva, 2008. págs. 164-165. Recuperado de: <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/10043>
- [9] Ministerio de Fomento, Puertos del Estado. *Clima medio de oleaje – Nodo SIMAR 5026021*. Recuperado de: www.puertos.es
- [10] Ministerio de Fomento, Puertos del Estado. *Clima medio de oleaje – Nodo SIMAR 5026023*. Recuperado de: www.puertos.es
- [11] Ministerio de Fomento, Puertos del Estado. *Extremos máximos de oleaje (Altura significativa)*. Recuperado de: www.puertos.es

- [12] Sierra, J., y Lo Presti Blanco, A. (1998). Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. *Ingeniería del agua*, 5(1). doi: <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2741>. Recuperado de: <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2741>
- [13] Gyssels P., Baldissone C.M., Hillman G., Rodríguez A., Bosc J., Corral M., Pagot M., Brea D., Spalletti P., y Farias H.D. (2013). Aplicaciones del modelo numérico Delft3D a diferentes problemas hidrosedimentológicos en casos argentinos. *Mecánica Computacional* Volume XXXII. Number 33. Numerical Simulation, Modeling and Environmental Analysis, págs. 2757-2777. Recuperado de: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4517/4447>
- [14] Olabarrieta, M., Warner, J. C., y Kumar, N. (2011), Wave-current interaction in Willapa Bay, *Journal of Geophysical Research*, 116, C12014, doi:10.1029/2011JC007387. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/236271767_Wave-current_interaction_in_Willapa_Bay
- [15] Pendón, G., (1997). *Geología Costera. Algunos aspectos metodológicos y ejemplos locales*. Huelva Universidad, Servicio de Publicaciones, 1997.
- [16] Garel, E., Sousa, C., Ferreira, Ó., Morales J.A., (2014). Decadal morphological response of an ebb-tidal delta and down-drift beach to artificial breaching and inlet stabilisation. *Geomorphology*. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.03.031
- [17] Deltares, (2014). *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual. Hydro-Morphodynamics*. Recuperado de: https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-WAVE_User_Manual.pdf
- [18] Málvarez García, G.C., Tejada Tejada, M. *Un recorrido por la costa occidental onubense*. Recuperado de: https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Patrimonio_Natural._Uso_Y_Gestion/Espacios_Protegidos/publicaciones_renpa/paisajes_marruecos/05_costa_occidental_onubense.pdf
- [19] del Rosal Salido, J., (2013). *Influencia de las acciones humanas en la hidrodinámica de la bahía de Cádiz* (PFC). Recuperado de: <http://digibug.ugr.es/handle/10481/32312>
- [20] MARCIGLOB. "Proyecto de actuaciones en el Maresme; TT.MM. de El Masnou – Premià de Mar (Barcelona) Anejo nº 4. Estudio de Dinámica Litoral" Recuperado de: https://www.mapama.gob.es/es/costas/participacion-publica/proyectopremia_parte2_tcm30-444516.pdf
- [21] Ecologistas en acción (02/07/2012). *Izada de bandera negra en la playa de Isla Canela*. Recuperado de: <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=23627>
- [22] Trujillo, R., (2018) Resumen de erosión 2018. *Asociación de vecinos de Isla Canela y Punta del Moral (AVECA)*. Recuperado de: http://www.aveca.es/index.php?option=com_content&view=article&id=90:2018-02-07-10-25-34&catid=1:noticias&Itemid=6